

Konditionierungsverhalten von Hochspannungs- vakuumanordnungen bei inhomogener Feldverteilung

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Torsten Psotta
geboren am 30. September 1983 in Mainz

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler
Tag der Einreichung:	13.06.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	13.12.2016

D17

Darmstadt 2017

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen für die Ermöglichung dieser Promotion, für seine fachliche Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen und dem damit verbundenen Gestaltungsspielraum.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Diese Arbeit wurde finanziell von der Siemens AG unterstützt. Hier möchte ich mich besonders bei Herrn Dr. Stefan Giere, Herrn Dr. Edelhard Kynast, Herrn Stephan Wethekam, Herrn Frank Richter, Herrn Jörg Teichmann, Herrn Dr. Erik Taylor, Herrn Ulf Schümann und dem leider bereits verstorbenen Herrn Dr. Roman Renz für die fachliche Unterstützung und die Bereitstellung von Prüflingen bedanken. Darüber hinaus danke ich allen weiteren Siemensmitarbeitern die an diesem Projekt beteiligt waren.

Ein großer Dank gehört den Werkstattmitarbeiter des Fachgebiets Hochspannungstechnik. Durch deren deren Hilfe und Ideen diese Arbeit erst möglich wurde.

Für die Realisierung komplizierter Versuchsaufbauten und die Durchführung der eintönigen Messaufgaben bedanke ich mich bei allen Studenten, die im Rahmen einer studentischen Arbeit, oder als Hiwi dieses Projekt unterstützt haben.

Zudem bedanke ich mich bei all meinen Kollegen für die fachliche Unterstützung sowie den freundschaftlichen Umgang. Hervorheben möchte ich hier meine ehemaligen Bürokollegen, welche mir auch eine große Hilfe bei der Literaturrecherche waren.

Ich danke außerdem allen Personen die dieses Manuskript gelesen und mich inhaltlich sowie orthografisch verbessert haben.

Meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir das Studium und auch die Promotion erst ermöglichten, gilt ein ganz besonderer Dank.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Formelzeichen und Abkürzungen.....	V
Kurzfassung	VIII
Abstract.....	IX
1 Einleitung.....	1
2 Theoretische Grundlagen.....	4
2.1 Vakuumdurchschlag	4
2.1.1 Feldemission	6
2.1.2 Kathodeninitiiertes Durchschlag	9
2.1.3 Anodeninitiiertes Durchschlag	9
2.1.4 Fremdschichtinitiiertes Durchschlag	10
2.1.5 Partikelinduziertes Durchschlag	11
2.1.6 Isolatorüberschlag	13
2.2 Konditionierung/Dekonditionierung	15
2.2.1 Niederdruck-Gasentladungskonditionierung	17
2.2.2 Gaskonditionierung	17
2.2.3 Vorstromkonditionierung	18
2.2.4 Durchschlagskonditionierung	19
2.2.5 Stromkonditionierung	20
2.2.6 Konditionierung mit stromstarken Entladungen	21
2.3 Vakuumschaltröhren	22
2.4 Stand des Wissens zur Konditionierung	24
3 Ziele der Arbeit	30
4 Prüfkörper	34

4.1	Aufbau der Prüfkörper	34
4.2	Herstellungsverfahren	39
5	Prüfaufbau und Prüfablauf	41
5.1	Prüfaufbau	41
5.2	Prüfkreise	43
5.3	Prüfablauf	46
6	Experimentelle Untersuchungen	49
6.1	Konditionierungsverlauf	49
6.1.1	Allgemeiner Konditionierungsverlauf	49
6.1.2	Vorkonditionierung mit Wechselspannung	61
6.1.3	Konditionierungsverlauf unter Stoßspannung mit unterschiedlichen Strombegrenzungswiderständen	64
6.1.4	Konditionierungsverlauf unter Stoßspannung mit einer zusätzlichen Parallelkapazität	75
6.1.5	Einfluss der Keramik auf das Konditionierungsverhalten	78
6.2	Verhalten der elektrischen Parameter bei konditionierenden und dekontitionierenden Durchschlägen	84
6.3	Einfluss von weiteren Herstellungsfaktoren auf die dielektrische Festigkeit..	92
6.3.1	Exzentrizität	92
6.3.2	Oberflächenrauheit	101
7	FEM-Simulation	104
8	Diskussion der Ergebnisse	108
9	Zusammenfassung und Ausblick	117
	Anhang	121
A	Statistische Verfahren zur Auswertung von Durchschlagversuchen	121
B	Regressionsanalyse	124

C	Detaillierte Übersicht über die einzelnen Messergebnisse der Stehspannungsprüfung mit Blitzstoßspannung	125
D	Konditionierungsverlauf und Konditionierungskennzahlen der Wechselfspannungsmessung	131
E	Konditionierungskennzahlen der Stoßspannungsmessung	138
Literaturverzeichnis.....		144
Lebenslauf.....		152
Erklärung laut § 9 PromO.....		153

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen mit Einheit:

α		Signifikanzniveau
A_e	m ²	Wirksame Emissionsfläche
β		Feldverstärkungsfaktor
β_u		Mikroskopischer Feldverstärkungsfaktor
B_1		Erste Fowler-Nordheim-Konstante
B_2		Zweite Fowler-Nordheim-Konstante
C_{HS}	F	Hochspannungskapazität
C_L	F	Lastkapazität
C_P	F	Parallelkapazität
C_{NS}	F	Niederspannungskapazität
C_S	F	Schubkapazität
δ	N/mm ²	Zugfestigkeit
E	V/m	Elektrische Feldstärke
E_{0v}	V/m	Maximale elektrische Feldstärke vor dem Konditionieren, bei der es zu keinem Überschlag kommt
E_{0n}	V/m	Maximale elektrische Feldstärke nach dem Konditionieren, bei der es zu keinem Überschlag kommt
E_m	V/m	Makroskopische Feldstärke
E_{max}	V/m	Maximale Feldstärke
E_μ	V/m	Mikroskopische Feldstärke
E_k	V/m	Kritische Feldstärke
$E_{k,min}$	V/m	Minimale Konditionierungsfeldstärke
GWP_{100}		Treibhauspotential über einen Zeithorizont von 100 Jahren
η		Konditionierungsquotient nach Latham
η_A		Absoluter Konditionierungsgrad
η_D		Dekonditionierungsgrad
I	A	Strom
I_e	A	Feldemissionsstrom
m	kg	Masse
μ		Mittelwert
n		Anzahl
p	Pa	Druck

Q	C	Ladung
R_a	m	Arithmetischer Mittenrauwert
R_{begrenz}	Ω	Strombegrenzungswiderstand
R_D	Ω	Dämpfungswiderstand
R_{Di}	Ω	Innerer Dämpfungswiderstand
R_E	Ω	Entladewiderstand
r	m	Partikelradius
r_{min}	m	Minimaler Partikelradius
ρ	kg/m ³	Dichte
s	m	Schlagweite
S_A	V/s	Spannungssteilheiten im Anstieg
s_e		Empirische Standardabweichung
s_{min}	m	Minimale Schlagweite
s_{rel}	m	Relativer Abstand
$s_{\text{rel,max}}$	m	Maximaler relativer Abstand
$s_{\text{rel,max,all}}$	m	Maximaler relativer Abstand aller Prüfkörper
$s_{\text{rel,min}}$	m	Minimaler relativer Abstand
$s_{\text{rel,min,all}}$	m	Minimaler relativer Abstand aller Prüfkörper
$s_{\text{rel,pol}}$	m	Transformierter relativer Abstand für Polarkoordinatensystem
σ		Standardabweichung
τ		Konditionierungskoeffizient
t	s	Zeit
t_d	s	Zündverzugszeit
U	V	Spannung
\ddot{u}		Übersetzungsverhältnis
U_1	V	Durchschlagspannung des ersten Durchschlags
$U_{A,S}$	V	Maximal simulierte Durchschlagspannung
U_A	V	Maximal erreichbare Durchschlagspannung bei Stoßspannungsprüfung
\hat{U}_{AC}	V	Wechselspannung-Scheitelwert
$U_{AC,\text{eff}}$	V	Wechselspannung-Effektivwert
U_{d0}	V	Sichere Stehspannung
U_{d50}	V	50 %-Durchschlagspannung
U_{d100}	V	Sichere Durchschlagspannung

$U_{D,n}$	V	Durchschlagspannung des n-ten Durchschlags
U_{Halte}	V	Haltespannung nach Konditionierung
U_{KKK}	V	Konditionierungsspannung der Kreiskonfiguration
U_L	V	Maximale gemessene Durchschlagspannung
\hat{U}_{LI}	V	Blitzstoßspannungsscheitelwert
\bar{U}_m	V	Arithmetischer Spannungsmittelwert
U_S	V	Höchste Systemspannung (verkettet)
U_R	V	Relative Spannungsfestigkeitssteigerung
v	m/s	Geschwindigkeit
v_c	m/s	Kritische Aufschlagsgeschwindigkeit
$v_{c,cu}$	m/s	Kritische Aufschlagsgeschwindigkeit bei Kupfer
W	J	Energie
W_{test}		Statistische Testgröße
$W_{\text{test-krit}}$		Kritische Testgröße
\bar{X}		Mittelwert einer Größe X
φ	eV	Austrittsarbeit

Abkürzungen:

AC	Wechselstrom (Alternating Current)
Al_2O_3	Aluminiumoxid
BIL	Basic Lightning Insulation Level
Cu	Kupfer
Cr	Chrom
DC	Gleichstrom (Direct Current)
HS	Hochspannung
SF_6	Schwefelhexafluorid
IVÜ	Isolatorvakuumüberschlag

Kurzfassung

Der Einsatz von Vakuumschalttechnik im Hochspannungsbereich führt zu neuen Herausforderungen für Entwickler von Vakuumschaltröhren. Durch die größeren Abmessungen ist eine Feldsteuerung nötig, die mithilfe mehrerer Metaldampfschirme realisiert wird.

In dieser Arbeit werden Prüfkörper mit verschiedenen Metaldampfschirmmodellen untersucht.

Zur Ermittlung einer Spannungsfestigkeit müssen die Prüfkörper als erstes konditioniert werden. Beim Konditionieren mit Normblitzstoßspannung ist es nicht möglich, eine Spannungsfestigkeit anzugeben. Durch die Veränderung des Spannungsimpulses können jedoch Ergebnisse erzielt werden, mit denen das möglich ist. Die Impulsform ist davon abhängig, wie groß die verwendeten Elemente im Impulserzeugungskreis sind. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Auswirkung einzelner Parameter auf den Konditionierungsverlauf und damit, welche Faktoren für einen optimalen Konditionierungsverlauf wichtig sind.

Trotz der besseren Ergebnisse durch einen optimierten Konditionierungskreis ist die Streuung relativ hoch. Aus diesem Grund wird neben dem Einfluss der Kreisparameter auch untersucht, in wie weit sich Fertigungstoleranzen industriell gefertigter Vakuumschaltröhren auf das dielektrische Verhalten auswirken. Es wird überprüft, wie groß die Exzentrizität der Metaldampfschirme und der Keramik ist, und ob es einen Zusammenhang zwischen der Stelle mit dem geringsten Abstand zwischen Keramik und Metaldampfschirm und dem vermehrten Auftreten von Durchschlägen gibt. Des Weiteren wird untersucht, ob es eine Korrelation zwischen den Stellen, an denen es häufig zum Durchschlag gekommen ist, und der dort befindlichen Oberflächenrauheit gibt. Mithilfe einer FEM Simulation werden die experimentell gefundenen Ergebnisse weiter analysiert. Es werden die Stellen mit der höchsten Feldbeanspruchung identifiziert und mit den Stellen der tatsächlich auftretenden Durchschlägen verglichen.

Aus den Ergebnissen lassen sich zwei Erkenntnisse ableiten: zum einen, dass der Konditionierungsvorgang hauptsächlich von der Ladungsmenge abhängt und zum anderen, dass der Tripelpunkt Keramik-Elektrode-Vakuum in hohem Maße die dielektrische Festigkeit einer Vakuumanordnung beeinflusst.

Abstract

The use of vacuum circuit breaker technology in the high voltage level leads to new challenges for developers of vacuum interrupters. The larger dimensions of the vacuum bottle needs a field control system, which will be realised by multiple vapour shields.

In this study, specimens with various metal vapour shield models are examined.

To determine a dielectric strength, the test specimens have to be conditioned first. When conditioning with standard lightning impulse withstand voltage, it is not possible to specify certain withstand voltage. By changing the shape of the voltage pulse, the achieving of a certain withstand voltage is possible. The pulse shape is dependent on the values of the elements used in the pulse generating circuit. This paper deals with the impact of individual parameters on the conditioning behaviour and thus the factors for an optimal conditioning process.

Despite the better results through an optimized conditioning circuit, the scattering is relatively high. For this reason, not only the circuit parameters were investigated, the impact of manufacturing tolerances of industrially manufactured vacuum interrupters were investigated, too. It was checked how large the eccentricity of the metal vapour shields and ceramic are, and whether there is a connection between the point with the least distance between ceramic and metal vapour shield and the increased occurrence of arcing. Furthermore, it was also examined, whether there is a correlation between the locations where flashovers occur often and the surface roughness located there. Using a FEM simulation, the experimental data was further analysed. Places with high field stress were identified compared with places, where arcs actually originate.

From the results two findings can be drawn: Firstly, that the conditioning process depends mainly on the amount of charge, and secondly, that the triple point ceramic-electrode-vacuum affect the dielectric strength of a vacuum insulated electrode arrangement highly.

1 Einleitung

Der Leistungsschalter ist ein essentielles Betriebsmittel für die Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Er wird eingesetzt, um einzelne Netzabschnitte und Betriebsmittel zu steuern und zu schützen. Dies führt dazu, dass die Anforderungen an einen Leistungsschalter sehr vielfältig sind. Um all diese Anforderungen zu erfüllen, wurden für verschiedene Einsatzbereiche verschiedene Technologien entwickelt.

Im Mittelspannungsbereich ($U_S \leq 52 \text{ kV}$) hat sich der Vakuumschalter durchgesetzt, der hier schon seit über 30 Jahren eingesetzt wird. Durch diesen langen Zeitraum und die hohe Anzahl an Schaltern konnten viele Erfahrungen gesammelt und die Technik optimiert werden. Seine besonderen Eigenschaften, wie kompakte Bauweise, Wartungsfreiheit, hohe Schaltzahl, geringe Wartungskosten und die Fähigkeit der Unterbrechung von Strömen mit sehr hohen Stromsteilheiten (di/dt) sind nur einige Eigenschaften, weshalb der Vakuumschalter der am häufigste verwendete Schalter im Mittelspannungsbereich ist [Sla08] [Reu03]. Der Anteil der Vakuumschalter im Mittelspannungsbereich liegt länderspezifisch zwischen 80 und 100 % [Sme14].

Im Bereich der Hochspannungsebenen ($U_S \geq 72,5 \text{ kV}$) ist der Schwefelhexafluorid- (SF_6)-Schalter der am meisten verbreitete Schalter. Die Gründe dafür sind die Eigenschaften des Isoliermediums SF_6 . Es hat eine bis zu 2,5-mal höhere dielektrische Festigkeit als Luft bei gleichem Druck. Durch seine hohe Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich des Lichtbogens im Stromnulldurchgang ist seine Fähigkeit, den Lichtbogen zu löschen 10-mal höher als die von Luft. Diese Eigenschaften des nicht toxischen und inerten Gases erlauben es, Hochspannungsschaltanlagen mit deutlich weniger Platzbedarf zu bauen [Gar97] [Gie02] [Nak91] [Rya89].

Ein Nachteil von SF_6 ist sein hohes Treibhauspotential, es hat einen GWP_{100} -Wert von 22800 [Sme14], was bedeutet, dass SF_6 innerhalb der ersten 100 Jahren nach seiner Freisetzung 22800-mal so stark zum Treibhauseffekt beiträgt wie die gleiche Masse CO_2 . Nach dem Kyoto-Protokoll von 2005 sind die Mitgliedsländer der Vereinten Nationen dazu verpflichtet, den Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren. Das führte zur strengen Überwachung und Reglementierung von SF_6 . Einige Länder, wie Australien, führten in diesem Zuge auch zeitweise eine Einfuhrsteuer für SF_6 ein. Aus diesem Grund ist die

Energiewirtschaft bemüht, die Gesamtmenge SF₆ soweit wie möglich zu minimieren, auch wenn der SF₆-Anteil, der durch elektrische Betriebsmittel freigesetzt wird (im Jahr 2010 0,04 %), nur im geringen Maße am Treibhauseffekt beteiligt ist [Gar02] [Gie02] [Sme14].

Zur Vermeidung von SF₆-Emissionen gibt es mehrere Ansatzpunkte. Durch neue Designs der Schalter wurden die Leckrate und die benutzte Menge an Gas reduziert. Benutztes Gas wird, wenn möglich, wieder verwendet oder aufbereitet. Reines SF₆ wird in einigen Fällen durch ein Gemisch von SF₆ und Stickstoff ersetzt, dadurch wird der SF₆-Verbrauch schon jetzt minimiert. Durch die Vermischung von SF₆ mit anderen Gasen sinkt der Siedepunkt des Gasgemisches. Dadurch ist es nicht immer möglich, das Gemisch in elektrischen Betriebsmitteln zu verwenden. In kälteren Regionen würde sich das Gasgemisch verflüssigen und die Isolationsfähigkeit wäre nicht mehr gegeben.

Da die Bemühungen weiterhin darin bestehen, Treibhausgase zu reduzieren, wird versucht, SF₆ komplett zu vermeiden. Zurzeit wird von vielen Herstellern der Einsatz von Ersatzgasen erforscht. Hier haben sich Fluorketone und Fluornitrile als Alternative herausgestellt [Hyr15]. Diese müssen jedoch noch mit einem Trägergas kombiniert werden, damit sie ähnlich gute Eigenschaften wie SF₆ haben. Dieser Bereich steht noch ganz am Anfang der Entwicklung. Zurzeit beschäftigt sich die Forschung mit der Auswahl der am besten geeigneten alternativen Isolier- und Trägergase sowie deren Mischverhältnisse. Bisher gibt es aber keine Erkenntnisse zum Betriebs- und Langzeitverhalten. Zurzeit werden erste Geräte mit dem Ersatzgas angeboten und einige Pilotprojekte aufgebaut. Für breite Massenanwendungen sind diese Produkte aber noch nicht zu gebrauchen [Hyr15] [Sme14].

Ein anderer Ansatzpunkt ist es, die SF₆-Schalttechnik durch Vakuumschalttechnik zu ersetzen. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz der Vakuumschalttechnik im Hochspannungsbereich grundsätzlich möglich ist. Hier wurde schon 1968 ein 132-kV-Vakuumschalter entwickelt, der aus acht in Reihe geschalteten Vakuumröhren bestand. Moderne Hochspannungsvakuumschalter bestehen aus zwei Vakuumschaltröhren und arbeiten bis zu Spannungsebenen von 204 kV [Sme14]. Parallel dazu wurden auch komplett neue Vakuumschaltröhren konstruiert, die im Hochspannungsbereich eingesetzt werden können. Diese können einzeln bis zu einer Spannungsebene von 145 kV

eingesetzt werden. Der Großteil (ca. 99 %) der Hochspannungsvakuumschalter ist in den 72,5-84 kV-Ebenen installiert. Der Einsatz von Hochspannungsvakuumschaltröhren in höheren Spannungsebenen ist nur in vereinzelten Pilotprojekten erfolgt. Viele Hersteller haben schon Hochspannungsvakuumschalter im Programm. Durch die fehlende Praxiserfahrung und Laboruntersuchungen kann aber noch nicht davon gesprochen werden, dass der Hochspannungsvakuumschalter den SF₆-Schalter in nächster Zeit weiträumig ersetzen kann. Auch aus wirtschaftlicher Sicht lohnt sich der Austausch eines SF₆-Schalters durch einen Vakuumschalter noch nicht, da die Kosten beim Vakuumschalter höher sind [Fal04] [Gie02] [Sme14] [Yan98] [Wan06].

Aus den eben genannten Gründen ist es ein vorrangiges Ziel von Industrie und Politik, den SF₆-Schalter zu ersetzen, wo immer das geht. Da die alternative Substitution von SF₆ durch ein anderes Gas erst ganz am Anfang steht, ist die Verwendung von Hochspannungsvakuumschaltern ein vielversprechender Beitrag dazu. Erste Betriebserfahrung und Laboruntersuchungen haben jedoch gezeigt, dass es auf dem Gebiet der Hochspannungsvakuumschalttechnik noch einige ungelöste Probleme gibt. In dieser Arbeit sollen einige davon näher untersucht werden und Lösungsansätze gezeigt werden.

Ein essentieller Teil einer Vakuumschaltröhre ist der Metaldampfschirm. Seine Hauptaufgabe ist es, die Keramik vor kondensierendem Metaldampf zu schützen, der bei einem Schaltvorgang entsteht. Bei der Hochspannungsvakuumschaltröhre hat der Metaldampfschirm eine weitere wichtige Aufgabe. Er ist für die Feldsteuerung zuständig. Dafür ist es notwendig, dass der Metaldampfschirm nicht mehr aus einem Stück besteht, sondern aus mehreren Schirmen auf freiem Potential. Dadurch besteht aber auch die Möglichkeit, dass bei einem dielektrischen Versagen der Durchschlag über die Metaldampfschirme stattfinden kann. Durch eine optimierte Geometrie und optimierte Materialien verspricht man sich eine Verbesserung der dielektrischen Eigenschaften einer neuen Hochspannungsvakuumschaltröhre.

Die Spannungsfestigkeit von Vakuumelektrodenanordnungen unter Hochspannung weist eine sehr starke Streuung auf. Um diese zu minimieren, muss zusätzlich der Konditionierungsvorgang optimiert werden. Aus diesem Grund liegt ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf dem Thema Konditionierung/Dekonditionierung.

2 Theoretische Grundlagen

Bei jeder Schalthandlung kommt es zwangsläufig zu einem elektrischen Durchschlag des Isolationsmediums, da kurz vor Kontaktschließung oder nach Kontakttrennung der Kontaktabstand sehr gering ist. Der elektrische Durchschlag beschreibt eine Entladung, die entsteht, wenn die Feldbeanspruchung eines Isoliermediums dessen elektrische Festigkeit übersteigt. Der Durchschlagsmechanismus ist dabei abhängig von dessen Aggregatzustand. In Flüssigkeiten ist der Durchschlag von vielen Parametern, wie Partikelzahl, Partikelart, Partikelform, Strömung und Homogenität abhängig [Küc09]. Aufgrund der vielen Parameter und deren komplexer Zusammenhänge ist eine exakte Berechnung der elektrischen Festigkeit nicht möglich. Die elektrische Festigkeit von Feststoffen liegt weit über der von Flüssigkeiten und Gasen. Die Hauptursache der Durchschläge sind hier Verunreinigungen, nichtideales Stoffgefüge und Fehler im Material. Da es sich bei Feststoffen um eine nicht selbstheilende Isolation handelt, entstehen Folgedurchschläge schon bei einer viel geringeren Beanspruchung der Isolation. Der Gasdurchschlag ist primär vom Produkt aus Druck p und Schlagweite s abhängig. Bei homogenen Anordnungen wird aus diesen beiden Werten die entsprechende Durchschlagsspannung bestimmt. Vereinfacht gilt für den Nahdurchschlagsbereich, dass bei einem geringeren Druck eine höhere Spannungsfestigkeit vorliegt [Küc09]. Dieser Umstand ist die Grundlage der Vakuumschalttechnik. Detaillierter wird der Vakuumdurchschlag im nächsten Kapitel behandelt. Kapitel 2.2 geht genauer auf das Thema Konditionierung/Dekonditionierung ein. Der allgemeine Aufbau einer Vakuumschaltröhre wird in Kapitel 2.3 erklärt. Kapitel 2.4 befasst sich mit dem aktuellen Stand der Technik. Abschließend beschäftigt sich Kapitel 2.5 mit der Regressionsanalyse.

2.1 Vakuumdurchschlag

Um den Durchschlag im Vakuum zu verstehen, ist es von Vorteil, zunächst den Durchschlag in Gasen zu betrachten. Damit es einen Durchschlag in einem Isolationsmedium geben kann, sind freie Ladungsträger notwendig. Bei Gas als Isolationsmedium entwickelt sich im homogenen Feld der Durchschlag nach dem Generationen- oder Townsendmechanismus. Durch Fremddionisation (z. B. durch Höhenstrahlung) wird ein Elektron

aus seiner Bindung gelöst und steht als Startelektron zur Verfügung. Durch das anliegende elektrische Feld wird das Elektron beschleunigt. Auf dem Weg zur Anode trifft es auf Gasmoleküle. Am Anfang ist die kinetische Energie noch geringer als die Ionisierungsenergie und führt somit zu keiner Ionisierung. Da das Elektron viel leichter ist als das Gasmolekül, erfolgt ein elastischer Stoß. Aus der Impulserhaltung folgt, dass das Elektron bei den Stößen kaum Energie verliert. Somit steigt die kinetische Energie immer weiter, bis sie größer als die Ionisierungsenergie ist und es zu einem ionisierenden Stoß kommt, der weitere Elektronen aus deren Bindung löst. Diese Elektronen werden nun auch beschleunigt und können wiederum weitere Elektronen aus ihrer Bindung lösen. Es entsteht eine erste Elektronenlawine. Die bei dem Stoß entstandenen positiven Ionen bewegen sich zur Kathode und können beim Auftreffen Startelektronen für eine weitere Lawine erzeugen. Durch den Fotoeffekt entstehen zusätzliche Startelektronen. Dabei lösen Photonen, die von der Elektronenlawine ausgehen, Startelektronen aus der Elektrode. Wenn jedes an der Kathode startende Elektron auf seinem Weg zur Anode mindestens ein neues Elektron erzeugt, entsteht eine selbständige Entladung und es kommt zu einem Durchschlag. Je geringer der Druck ist, umso geringer ist die Anzahl der Gasteilchen, die für eine Stoßionisation zur Verfügung stehen. Dieses druckabhängige Verhalten wird durch die Paschenkurve, wie sie in Abbildung 2-1 dargestellt ist, beschrieben.

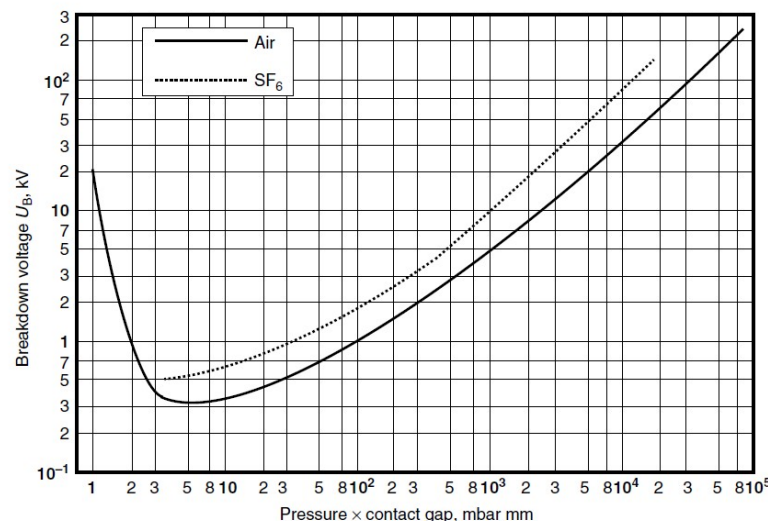


Abbildung 2-1: Beispiel einer Paschenkurve in Luft und SF₆ bei homogenem Feld [Sla08]

In der Paschenkurve wird die Durchschlagsspannung in Abhängigkeit vom Produkt aus der Schlagweite s und dem Druck p dargestellt. Das Paschen-Minimum ist die minimale

Durchschlagsspannung, unterhalb derer kein Gasdurchschlag möglich ist. Rechts davon befindet sich der Weidurchschlagsbereich, links davon der Nahdurchschlagsbereich. Man sieht, dass im Nahdurchschlagsbereich die Durchschlagsspannung mit sinkendem Druck zunimmt. Der typische Druck bei Vakuumschaltern liegt im Bereich 10^{-7} bis 10^{-9} bar. In diesem Bereich ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron auf ein Gasmolekül trifft, sehr gering. Dadurch kann sich auf diesem Weg keine Elektronenlawine bilden und damit auch kein Durchschlag entstehen. Dieses Verhalten ist die Grundlage für den Einsatz von Vakuum als Isolierstoff. Laut dieser Theorie ist so im Vakuum kein Durchschlag möglich. Da im Vakuum aber ein anderer Mechanismus für den Durchschlag zuständig ist, trifft dies nicht zu [Czi13] [Gre94] [Küc09].

Im Vakuum gibt es mehrere unterschiedliche Ursachen, die zu einem Durchschlag führen können. Es ist nicht möglich, zu sagen, welcher Durchschlagsmechanismus bei bestimmten Spannungen und Kontaktabständen dominiert, da der Anfangszustand der Elektroden nicht bekannt ist und sich die Oberfläche bei jedem Durchschlag verändert. Allgemein gilt, dass Durchschläge bei kleinen Kontaktabständen aufgrund von Feldemissionsstrom bei Feldstärken $E > 2 \frac{kV}{mm}$ auftreten, während bei größeren Kontaktabständen aufgrund der geringen Feldstärken die Durchschläge größtenteils durch Mikropartikel hervorgerufen werden [Lat95] [Sla08]. Die Durchschlagsmechanismen sollen in den folgenden Kapiteln erklärt werden.

2.1.1 Feldemission

Die für den Vakuumdurchschlag notwendigen Ladungsträger sind im Vakuum nicht vorhanden. Sie entstehen aus Emissionsprozessen an den Elektroden. Bei Raumtemperatur haben Elektronen nicht genug Energie, um sich aus dem Leitungsband zu lösen. Damit dies geschehen kann, wird eine materialspezifische Austrittsarbeit benötigt. Tabelle 2.1 zeigt die Austrittsarbeit einiger Metalle mit deren kritischer Feldstärke E_K , ab der ein Durchschlag stattfindet [Sla08].

Tabelle 2.1: Austrittsarbeit und kritische Feldstärke für Vakuumdurchschläge bei kleinen Kontaktabständen für verschiedene Metalle [Sla08]

Metall	E_K in $10^8 \frac{V}{m}$	ϕ in eV
Edelstahl	59	4,4
Molybdän	57	4,4
Kupfer	69	4,5
Wolfram	67	4,5
Chrom	53	4,6
Nickel	99	4,6
Gold	64	4,8

In der Praxis kommt es schon bei viel geringeren Feldstärken zu einem Durchschlag. Durch mikroskopische Unebenheiten und andere Fehlstellen, wie Korngrenzen an der Oberfläche, Oberflächeneinschlüsse und adsorbierte Gasschichten, kommt es zu einer lokalen Felderhöhung, durch die Elektronen austreten können. In der Literatur wird dieser Umstand mit dem Feldverstärkungsfaktor β berücksichtigt. Dieser setzt die mikroskopische Feldstärke E_μ ins Verhältnis zur makroskopischen Feldstärke E_m (Gleichung (2.1)).

$$E_\mu = \beta E_m \quad (2.1)$$

Über die Geometrie der Elektrode kann man E_m beeinflussen, über die Oberflächenbeschaffenheit E_μ . Der Strom, der sich durch diese Elektronen einstellt, wird als Feldemissionsstrom I_e bezeichnet. In der Literatur wird der Feldemissionsstrom meist durch die Fowler-Nordheim-Gleichung (Gleichung (2.2)) beschrieben [Sla08].

$$\lg\left(\frac{I_e}{U^2}\right) = \lg\left(\frac{A_e B_1 \beta^2}{\phi s^2}\right) - \frac{B_2 \phi^{1,5}}{2,303 \beta} \left(\frac{1}{U}\right) \quad (2.2)$$

In dieser vereinfachten Form sind B_1 und B_2 Konstanten, die Fowler und Nordheim experimentell ermittelt haben. Diese Form der Darstellung ermöglicht es, Fowler-Nordheim-Graphen zu erstellen. Abbildung 2-2 zeigt ein Beispiel für einen Fowler-Nordheim-Graphen [Fow28] [Lat95] [Sla08].

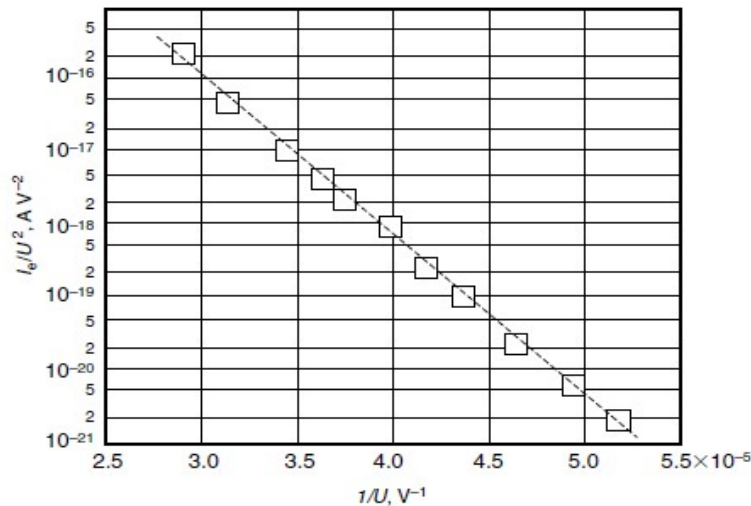


Abbildung 2-2: Fowler-Nordheim-Graph (Rechteck = gemessene Werte; gestrichelt = berechneter FN-Graph) [Sla08]

Aus diesen Geraden können Informationen über die Elektrodenoberfläche ermittelt werden. Den Feldverstärkungsfaktor β kann man aus der Steigung der Geraden ablesen, die wirksame Emissionsfläche A_e bestimmt man aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate.

Der Feldverstärkungsfaktor wird in der Praxis durch die Messung des Feldemissionsstroms und die Auswertung der Fowler-Nordheim-Geraden ermittelt. Er setzt sich dabei wie die Feldstärke aus einem makroskopischen und einem mikroskopischen Teil zusammen. Die Aufteilung der Anteile lässt sich aus den Messungen nicht bestimmen. Erfahrungsgemäß unterscheidet sich der makroskopische Anteil vom mikroskopischen um den Faktor 10 bis 1000. Der makroskopische Anteil wird dabei größtenteils von der Elektrodenform bestimmt und trägt den geringeren Teil zum Gesamtverstärkungsfaktor bei [Lat95] [Sla08].

Durch Feldemission können sich zwei Arten von Durchschlägen bilden, der kathodeninitiierte und der anodeninitiierte Durchschlag.

2.1.2 Kathodeninitiiertes Durchschlag

Beim kathodeninitiierten Durchschlag führt der Feldemissionsstrom zu einer Temperaturerhöhung des Emitters. Wenn der Anstieg der Stromdichte steil genug ist, wird mehr Energie zugeführt, als durch Wärmeleitung und Wärmeabstrahlung abgeführt werden kann. Ab einer Stromdichte von mehr als $10^8 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ [Gol90] kommt es zur Explosion des Emitters. Dabei verdampft das Metall und erzeugt so Ladungsträger und neutralen Metalldampf, der von den emittierten Elektronen ionisiert werden kann. Die Explosion übt eine Kraft auf das flüssige Metall im Zentrum des Kraters aus. Dies führt zur Bildung von neuen Spitzen am Kraterrand sowie zu Eruptionen von Mikro-Metalltröpfchen, die wiederum neue Emitter bilden [Gol90] [Lip03] [Sla08].

2.1.3 Anodeninitiiertes Durchschlag

Beim anodeninitiierten Durchschlag werden die emittierten Elektronen zur Anode hin beschleunigt. Diese treffen dann mit hoher kinetischer Energie auf die Elektrodenoberfläche auf. Der Elektronenstrahl konzentriert sich dort auch an Stellen mit erhöhter Feldstärke. Die kinetische Energie wird dann in Wärme und in Bremsstrahlung umgewandelt. Dadurch schmilzt das Anodenmaterial, und die Ladungsträger können aus der Elektrode austreten [Lat95] [Lip03] [Sla08].

Der kathodeninitiierte Durchschlag benötigt hohe Oberflächenfeldstärken, wohingegen der anodeninitiierte Durchschlag von der kinetischen Energie der Elektronen abhängig ist. Aus diesem Grund findet der kathodeninitiierte Durchschlag bei Kontaktabständen $s < 2 \text{ mm}$ statt. In diesem Bereich ist die Durchschlagsspannung proportional zum Kontaktabstand. Damit die Elektronen für den anodeninitiierten Durchschlag genug kinetische Energie haben, brauchen sie eine größere Wegstrecke zum Beschleunigen. Dafür sind höhere Spannungen notwendig. Der anodeninitiierte Durchschlag tritt deshalb erst bei einem Kontaktabstand $s > 5 \text{ mm}$ auf und ist charakterisiert durch den nicht linearen Zusammenhang zwischen Durchschlagsspannung und Kontaktabstand [Lat95] [Sla08].

2.1.4 Fremdschichtinitiiierter Durchschlag

Eine weitere Ursache für Durchschläge sind Fremdschichten auf den Elektroden. Dazu zählen [Lat95]:

- Isolierende und halbleitende Oxidschichten
- Lokale Oxideinlagerungen
- Adsorbierte Gasschichten
- komplexe Mehrschichtendielektrika durch Kombination mehrere Fremdschichten
- Staubpartikel

Bei isolierenden und halbleitenden Oxidschichten kann es zu Durchschlägen kommen. Grund dafür ist der „Switching“-Effekt. Dieser entsteht durch Ionisierung der Oxidschicht bei hohen Feldstärken ($E > 10^9 \frac{V}{m}$). Es bilden sich aufgrund elektrochemischer Effekte schwach leitende Kanäle von der Metalloberfläche durch die Isolierschicht. Diese erwärmen sich durch elektrische Verluste und führen zu einem Anstieg der Leitfähigkeit. Die leitfähigen Kanäle führen auf dieselbe Art und Weise wie Mikrospitzen zu einem Durchschlag [Lat95] [Lip03] [Sla08].

Bei dem Durchschlag, der durch adsorbierte Gasschichten initiiert wird, wirkt ein anderer Mechanismus. Bei der Adsorption handelt es sich um Gasteilchen, die sich an der Oberfläche von Elektroden und Isolator anheften. Grund hierfür sind keine chemischen Bindungen, sondern Van-der-Waals-Kräfte. Die adsorbierten Gasteilchen bestehen zum Großteil aus Wassermolekülen und Kohlenwasserstoffen. Diese verringern die Austrittsarbeit und steigern die Tunnelwahrscheinlichkeit der Elektronen. Durch den Tunneleffekt können Teilchen durch einen Potentialwall „durchtunneln“ auch wenn die kinetische Energie des Teilchens geringer ist als die Höhe der Potentialbarriere. Je nach angelagerter Gas- und Anlagerungsart kann sich die Emissionsrate ändern. Bei Wassermolekülen verringert sich zum Beispiel die Austrittsarbeit um 0,5 eV, und die Elektronenemission kann sich um bis zu 50 % erhöhen [Lat95] [Lip03] [Sla08].

Ein weiterer Mechanismus, durch den adsorbierte Gasschichten zu einem Durchschlag führen, ist die Desorption der Gasschicht auf der Kathode. Durch das Auftreffen von Elektronen auf der Kathode können sich Gasteilchen von der Elektrodenoberfläche lösen.

Es kommt zu einem lokalen Druckanstieg, der Ionisationsprozesse möglich macht [Lat95] [Lip03] [Sla08].

Eine Mischung aus beiden Durchschlagmechanismen (Oxidschichten und adsorbierte Gasschichten) entsteht durch Staubpartikel auf der Oberfläche. Sie können zu Switching-Effekten und zur Bildung von Raumladungen führen. Zusätzlich kommt es zu Oberflächenladungen, und durch die erhöhte Feldstärke am Tripelpunkt (Vakuum-Metall-Staubpartikel) entstehen an dieser Stelle vermehrt freie Elektronen. Diese werden zur Partikeloberfläche beschleunigt und erzeugen dort Sekundärelektronen [Lat95] [Lip03] [Sla08].

2.1.5 Partikelinduzierter Durchschlag

Die bisher genannten Durchschlagmechanismen gelten für kleine Elektrodenabstände. Je nach Autor werden Grenzwerte zwischen 2 mm - 5 mm angegeben [Gie02] [Lat95] [Sla08]. Bei größeren Kontaktabständen soll der Durchschlag durch Mikropartikel verursacht werden [Sla08]. Die in dieser Arbeit untersuchten Abstände liegen im Bereich 15 mm – 40 mm. Aufgrund dieser Theorie dürften nur noch partikelinduzierte Durchschläge vorkommen.

Bei der Herstellung von Vakuumschaltröhren kommt es unausweichlich zu Verunreinigungen durch den Herstellungsprozess. Der Hauptanteil resultiert aus Verunreinigungen durch die Oberflächenbearbeitung und durch Staub. Eine weitere Quelle von Partikeln sind Bereiche, die durch einen Elektronenbeschuss aufgrund von Feldemission eine erhöhte Temperatur haben. Aus diesem Bereich können sich Partikel lösen [Lat95] [Sla08].

Beim partikelinitiierten Durchschlag werden Teilchen durch das elektrische Feld beschleunigt und erzeugen beim Auftreffen auf der Elektrode ein Mikroplasma. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel zu einem Durchschlag führt ist abhängig von dessen Auftreffgeschwindigkeit v . Damit es zum Durchschlag kommen kann, muss diese Geschwindigkeit größer sein als die kritische Aufschlagsgeschwindigkeit v_c . Die kritische Aufschlagsgeschwindigkeit ist von der Zugfestigkeit δ und der Dichte ρ abhängig und wird nach Gleichung (2.3) berechnet [Nev06].

$$v_c \approx \sqrt{\frac{8\delta}{\rho}} \quad (2.3)$$

Ist die Partikelgeschwindigkeit kleiner als die kritische Aufschlagsgeschwindigkeit kommt es zu elastischen Stößen. Es kommt zu keinem Durchschlag, da das bewegte Partikel beim elastischen Stoß kaum Energie verliert. Wenn es weiter beschleunigt wird steigt sich die Geschwindigkeit soweit, bis aus dem elastischen Stoß ein unelastischer wird. Dies geschieht ab einer Partikelgeschwindigkeit $v > (1 - 1,5) v_c$ [Nev06]. Bei diesen Geschwindigkeiten kommt es zu einer bleibenden Verformung, an der es dann zur Elektronenemission kommen kann. Zusätzlich können durch den Einschlag noch Sekundärpartikel erzeugt werden. Ist die Partikelgeschwindigkeit $v \gg 5 v_c$, verdampft das Partikel beim Aufschlag auf der Elektrodenoberfläche und erzeugt dabei die für den Durchschlag benötigten Ladungsträger [Lat95]. Diese werden dann durch thermische und feldbasierte Prozesse ionisiert. Ein weiterer Parameter für den partikelinitiierten Durchschlag ist der Partikelradius r . Dieser muss in einem bestimmten Bereich liegen. Damit bei dem Auftreffen auf der Elektrode genügend Ladungsträger entstehen können, die notwendig sind, um einen Durchschlag einzuleiten, muss das Partikel einen minimalen Radius r_{\min} besitzen [Sla08]. Der Radius r_{\min} hängt von verschiedenen Versuchsparametern wie angelegte Spannung und Kontaktabstand ab [Lat95] [Nev06] [Sla08].

Bei den in dieser Arbeit verwendeten Elektrodenanordnungen ergeben sich die in Tabelle 2.2 berechneten Zeiten t für die Bewegung der Partikel von einer Elektrode zur anderen.

Tabelle 2.2: Partikelbewegungszeit für partikelinitiierte Durchschläge für Kupferelektroden ($v_{c,cu} = 200$ m/s)

Durchschlagsursache	s in mm	v in $\frac{m}{s}$	t in μs
Verdampfendes Partikel	40	> 1000	< 40
	15	> 1000	< 15
Emission durch Verformung	40	300 ... 1000	40 ... 133
	15	300 ... 1000	15 ... 50

Ab einer Partikelgeschwindigkeit von $v = 1,5v_{c,cu} = 300$ m/s entsteht der Durchschlag aufgrund von Emission durch Verformung, ab $v = 5v_{c,cu} = 1000$ m/s aufgrund von verdampfenden Partikeln. Die verstrichene Zeit zwischen dem Spannungsmaximum und dem eigentlichen Durchschlag wird Zündverzugszeit genannt. Mit ihr können Aussagen getroffen werden, welche Art von Durchschlagsmechanismus für einen Durchschlag verantwortlich ist. Neben den Durchschlägen, die sich durch Partikel bilden, die durch das elektrische Feld beschleunigt werden, können sich auch Durchschläge aufgrund von Partikeln

bilden, die durch Elektronenbeschuss erhitzt werden. Bei dem „Heated-Anode“-Modell wird die Anode durch den Elektronenstrahl lokal erhitzt. Aus der erhitzten Fläche kann ein Partikel aufgrund des elektrischen Feldes teilweise herausgezogen werden. Dadurch kommt es zu einer lokalen Feldüberhöhung, was dazu führt, dass der Elektronenstrom das Partikel weiter aufheizt, bis es verdampft [Lat95] [Sla08].

Ab einer Partikelgröße von 100 μm kann der Durchschlag nach dem „Trigger-Discharge“-Modell erfolgen. Dazu muss sich das Partikel kurz vor der Kathode befinden und positiv geladen sein. Durch die Feldstärkeerhöhung kommt es zu einem Anstieg der Elektronenemission, und es kann zu einer Entladung kommen, die zum Durchschlag führt. Dieser Mechanismus benötigt einen gewissen Zeitraum, für den das elektrische Feld anliegt. Aus diesem Grund erfolgt der Durchschlag nach dem „Trigger-Discharge“-Modell nicht bei Blitzstoßspannungen [Sla08]. Bei dieser Spannungsform werden negativ geladene Teilchen von der Kathode abgehoben und erzeugen so eine lokale Feldstärkeüberhöhung. Dieser Mechanismus erklärt auch partikelinitiierte Durchschläge, bei denen die Partikelgeschwindigkeit zu gering ist, um einen Durchschlag zu verursachen [Lat95] [Sla08].

2.1.6 Isolatorüberschlag

In einer realen Elektrodenanordnung gibt es neben dem reinen Vakuumdurchschlag auch einen Isolatorvakuumüberschlag (IVÜ). Dieser ist durch eine Elektrodenanordnung gekennzeichnet, bei der beide Elektroden im Vakuum angeordnet, aber durch einen festen Isolator miteinander verbunden sind. Damit das Vakuum erhalten bleibt, muss neben einer reinen Vakuumdurchschlagstrecke auch immer eine IVÜ-Strecke existieren. In Abbildung 2-3 ist ein realer Prüfaufbau dargestellt, bei dem die reine Vakuumdurchschlagstrecke und die IVÜ-Strecke markiert sind.

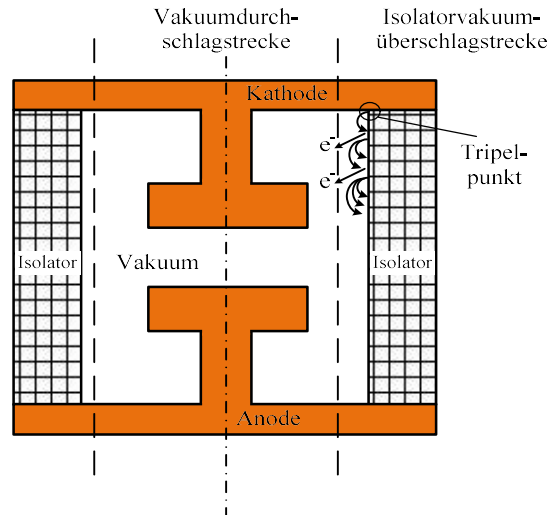


Abbildung 2-3: Elektrodenanordnung im Vakuum mit Vakuumdurchschlagstrecke und Isolatorvakuumüberschlagstrecke

Ausgangspunkt für einen Isolatorvakuumüberschlag sind Elektronen, die aus den Tripelpunkten schon bei geringer Feldstärke austreten können. Die Elektronen werden im Feld beschleunigt. Trifft ein Elektron auf der Oberfläche auf, wird Energie frei, da das freie Elektron einen höheren energetischen Zustand hat als das gebundene. Diese Energie reicht aus, um weitere Elektronen aus der Oberfläche zu lösen. So kann jedes einfallende Elektron ein anderes herauslösen. Dieser Mechanismus ist schematisch in Abbildung 2-3 dargestellt. Durch das Herauslösen weiterer Elektronen kann sich die Energie durch die Beschleunigung im elektrischen Feld vergrößern. Im Mittel werden von jedem Primärelektron bei Metall zwischen ein und zwei, bei Isolatoren zwischen drei und 15 Sekundärelektronen erzeugt. Diese werden dann durch das angelegte Feld beschleunigt und erzeugen weitere Sekundärelektronen. Es kommt zu einem Lawineneffekt. Durch diesen Mechanismus lädt sich die Oberfläche auf, wodurch die Sekundärelektronenemission nochmals verstärkt wird. Durch den Elektronenbeschuss wird die adsorbierte Gasschicht auf dem Isolator desorbiert. Die desorbierten Gasteilchen werden teilweise ionisiert, die positiven Ionen bewegen sich zur Kathode und verstärken dort das elektrische Feld am Tripelpunkt. Es werden dadurch noch mehr Elektronen emittiert. Dies geschieht solange, bis es zum Überschlag kommt [Bru42] [Lat95].

Nach einer anderen Theorie von Cross wird der Überschlag dadurch eingeleitet, dass die Elektronenlawine Bereiche der Isolatoroberfläche nach und nach auflädt. Das hat den Effekt, dass die Kathode sich immer weiter zur Anode ausbreitet, bis es zum Überschlag

kommt. Bei realen Versuchen findet der IVÜ nach beiden Theorien statt. Je nach Versuchsaufbau dominiert jeweils der eine oder andere Mechanismus [Cro78].

Die hier vorgestellten Mechanismen zeigen, dass grundsätzlich versucht werden muss, die Erzeugung von Startelektronen im Tripelpunkt und somit IVÜs zu vermeiden. Dies kann durch Schirmung und die Geometrie des Isolators an der Stoßkante zum Tripelpunkt geschehen. Es wird auch versucht, die Möglichkeit eines IVÜs so gering wie möglich zu halten, indem der Kontaktabstand der Elektroden klein gegenüber der Länge der Isolatoren gewählt wird. Da bei einem IVÜ aber relativ kleine Feldstärken ausreichen, um ein Elektron aus dem Tripelpunkt Metall-Isolator-Vakuum herauszulösen, kann davon ausgegangen werden, dass neben den reinen Vakuumdurchschlägen auch IVÜs stattfinden [Lat95].

2.2 Konditionierung/Dekonditionierung

Beim Vakuumdurchschlag tritt der Effekt der Konditionierung und Dekonditionierung auf. Bei der Konditionierung steigert und bei der Dekonditionierung verringert sich die Spannungsfestigkeit nach einem Durchschlag. Der Effekt der Konditionierung/Dekonditionierung ist beim Gasdurchschlag auch vorhanden, aber er ist dort nicht so ausgeprägt wie beim Vakuumdurchschlag. In Gasen beruht dieser Effekt darauf, dass mit jedem Durchschlag die Anzahl der freien Elektronen verändert wird, während er beim Vakuumdurchschlag direkt vom Zustand der Elektrodenoberfläche abhängig ist [Tio99]. Ein Beispiel eines Konditionierungsverlaufes zeigt Abbildung 2-4.

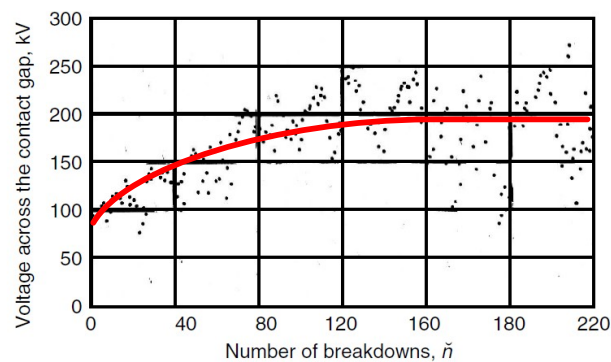


Abbildung 2-4: Typischer Konditionierungsverlauf mit Stoßspannung eines Cu-Cr-Kontakts in einer Vakuumschaltröhre mit 3 mm Kontaktabstand mit idealem Konditionierungsverlauf (rot) [Sla08]

Der ideale Konditionierungsverlauf ist in rot dargestellt. Bei der Betrachtung wird deutlich, dass sich die Spannungsfestigkeit durch Konditionieren von 100 kV auf 200 kV steigern lässt. Nach jedem Durchschlag wird die Spannungsfestigkeit höher, bis sich ein stabiler Mittelwert einstellt. Bei der Betrachtung der tatsächlichen Messwerte lässt sich aber erkennen, dass neben der Konditionierung auch teilweise eine Dekonditionierung stattfindet. Im Mittel ist die Spannung zwar nach 200 Durchschlägen höher als am Anfang, gleichzeitig steigt aber die Streuung [Sla08].

Durch die Durchschläge werden beim Konditionieren Emissionsquellen wie Mikrospitzen und Mikropartikel entfernt. Dieser Mechanismus ist der einzige, der den mikroskopischen Feldverstärkungsfaktor β_μ verändern kann. Bei der Dekonditionierung entstehen durch den Durchschlag neue Mikroemitter, so dass der nächste Durchschlag bei einer geringeren Spannung stattfindet. Dekonditionierung kann auch durch stromloses Schalten erfolgen. Dabei kommt es an der Kontaktstelle zu einer Kaltverschweißung beim Schließen der Kontakte. An der Grenzfläche verbinden sich die Metallatome zu einem stabilen Atomgitter. Durch eine hohe Oberflächengüte und unter Vakuum verstärkt sich dieser Effekt [Dil06]. Wenn die Kontakte wieder geöffnet werden, reißt die Schweißstelle auf und es entstehen scharfkantige Elektronenemitter. Durch Konditionieren kann die Spannungsfestigkeit einer Elektrodenanordnung um ein Vielfaches gesteigert werden. Aus diesem Grund wurden mehrere Verfahren zum Konditionieren entwickelt, die unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Diese werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt [Bal93] [Sla08].

Der Konditionierungseffekt ist auch beim Isolator vorhanden. Durch Isolatorüberschläge werden Verunreinigungen auf der Isolatoroberfläche entfernt und die Erzeugung von Sekundärelektronen wird erschwert. Der gesamte Konditionierungsvorgang setzt sich aus diesem Grund aus der Elektrodenkonditionierung und der Isolator-konditionierung zusammen. Die Verteilung der beiden Konditionierungen ist dabei von der Elektrodenanordnung abhängig. In den meisten Fällen entfällt der Großteil auf die Elektrodenkonditionierung und die Isolator-konditionierung kann meist vernachlässigt werden [Grz83] [Lat95]. Der erste Schritt vor der eigentlichen Konditionierung ist das Ausheizen. Dies geschieht bei der kompletten Röhre. Er beeinflusst den Verlauf des späteren Konditionierungsvorgangs und damit die erreichbare Spannungsfestigkeit. Bei einer Temperatur zwischen 500 °C und 700 °C (abhängig vom Material) wird der Werkstoff über mehrere Stunden ausgeheizt. Durch das Ausheizen werden angelagerte Gasschichten und Verunreinigungen (Oxidschichten und Dampfbedeckungen) entfernt [Bal93].

2.2.1 Niederdruck-Gasentladungskonditionierung

Bei dieser Konditionierungsmethode wird die Vakuumkammer mit Helium oder Stickstoff bei einem Druck im Bereich $10^{-6} - 10^{-5}$ bar gefüllt. Im Bereich des Paschenminimums wird dann eine Gasentladung gezündet, die für ungefähr eine Stunde aufrechterhalten wird. Eine noch längere Konditionierungszeit führt oft zu einer starken Dekonditionierung. Durch den Beschuss mit niederenergetischen Gasionen werden angelagerte Gasschichten auf den Kontakten entfernt. Dabei wird die angelagerte Gasschicht teilweise durch das eingebrachte Gas ersetzt. Das führt zu einer höheren Austrittsarbeit ϕ und zu einem geringeren Emissionsstrom. Es fließen dabei Entladeströme im Bereich von 30 mA. Im Anschluss wird die Vakuumkammer wieder evakuiert. Zur weiteren Konditionierung wird in der Praxis nach der Niederdruck-Gasentladungskonditionierung eine Durchschlagskonditionierung durchgeführt. Diese Konditionierungsart ist nicht mehr aktuell, da Vakuumröhren heute nicht mehr nach dem „Pinch-Off“-Verfahren hergestellt werden. Sie werden bereits unter Vakuum verlötet („Final Seal Brazing“) und besitzen keine Pumpstengel, um Gas ein- oder auszuleiten [Bal93] [Gre94] [Lat95] [Lip03].

2.2.2 Gaskonditionierung

Bei dieser Konditionierungsmethode wird die Vakuumkammer mit einem Edelgas bei einem Druck im Bereich 10^{-6} bar gefüllt. Bei einem Vorstrom im Bereich 50 μ A wird

eine Entladung gezündet. Dadurch kommt es zum „Sputtering“. Beim Sputtern werden hochenergetische Ionen auf die Oberfläche geschossen. Dadurch werden Atome aus der Elektrode herausgelöst und gehen in die Gasphase über. Hierbei werden die Mikrospitzen geglättet. Da bei diesem Verfahren die Atome in der Gasphase bleiben, ist der Konditionierungseffekt teilweise reversibel. Durch eine Erhitzung bei 200°C - 300°C kann die Konditionierung wieder rückgängig gemacht werden. Aus den gleichen Gründen wie bei der Niederdruck-Gaskonditionierung wird diese Konditionierungsart ebenfalls nicht mehr durchgeführt [Bal93] [Lat95].

2.2.3 Vorstromkonditionierung

Dieses Verfahren kommt zum Einsatz, wenn es zu keinem Durchschlag kommen darf. Es wird eine Spannung angelegt, die schrittweise bis zur Betriebsspannung gesteigert wird. Die Spannung bleibt solange anliegen, bis die Mikroentladungen aufhören und sich der Feldemissionsstrom stabilisiert hat. Dieser Vorgang ist in Abbildung 2-5 schematisch dargestellt.

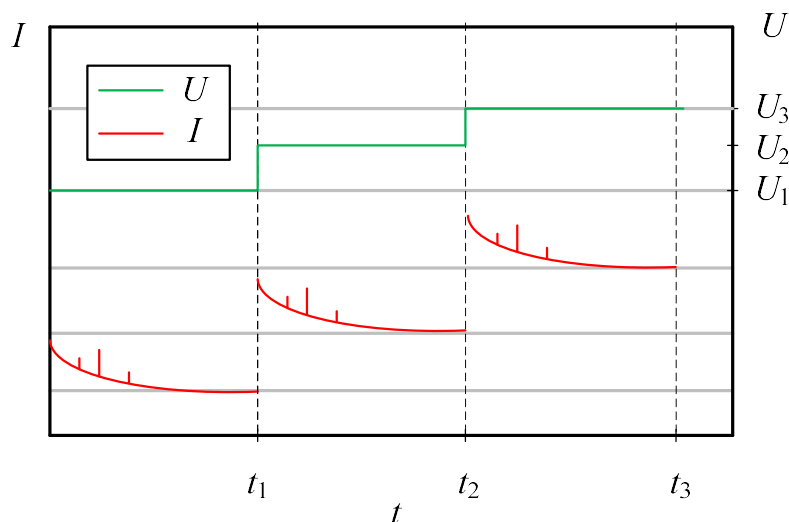


Abbildung 2-5: Schematisches Vorgehen bei der Vorstromkonditionierung nach [Bal98]

Die Konditionierung erfolgt über den Elektronenbeschuss der Anode. Dabei erhöht sich die Anodentemperatur. Neben dem Aufschmelzen der Mikroemitter wird auch die Anode entgast. Bei dieser Konditionierungsmethode ist die Erosion der Elektrode gering und die Konditionierungsdauer sehr lang (30 Minuten pro Spannungsstufe). Die Höhe des Konditionierungsstroms ist abhängig von den Materialparametern Oberflächenrauheit und Schmelzpunkt. Wird ein zu hoher Strom eingestellt, findet eine Dekonditionierung statt,

weil die Oberfläche aufgeraut wird. Die Konditionierung muss mit beiden Polaritäten der Spannung durchgeführt werden [Bal93] [Lat95].

2.2.4 Durchschlagskonditionierung

Die am häufigste verwendete Konditionierungsmethode für Vakuumschaltröhren ist die Durchschlagskonditionierung. Dabei wird bei einer Schaltzröhre mit geöffnetem Kontakt die Konditionierungsspannung solange gesteigert, bis die geforderte Spannungsfestigkeit erreicht wird. Die Konditionierung kann mit Wechsel-, Stoß- oder Gleichspannung erfolgen. Damit die Konditionierung maximale dielektrische Effizienz zeigt, empfiehlt es sich, diese mit mehreren Spannungsformen durchzuführen. Wurde eine Vakuumschaltstrecke mit Wechselspannung konditioniert, kann bei einer anschließenden Konditionierung mit Stoßspannung immer noch ein konditionierender Effekt beobachtet werden, mit dem die Stoßspannungsfestigkeit wesentlich gesteigert werden kann. Bei einer unipolaren Konditionierungsspannung müssen jedoch Polaritätseffekte berücksichtigt werden. Dabei dominiert die Kathode bei der Konditionierung. Abbildung 2-6 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Spannungsformen auf das Konditionierungsergebnis [Bal93] [Gre94] [Mil64] [Pso13] [Sla08].

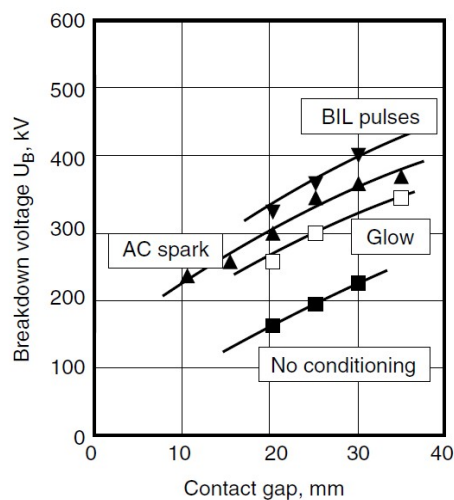


Abbildung 2-6: Vergleich von Durchschlagskonditionierung mit Stoßspannung (BIL pulses), Wechselspannung (AC spark) und Niederdruck-Gaskonditionierung (Glow) an einem Cu-Cr-Kontakt [Sla08]

Der Konditionierungseffekt beruht auf der Entfernung von Mikrospitzen, Partikeln und adsorbierten Gasschichten durch den Lichtbogen, wobei die Entfernung von Mikrospitzen dominiert. Der Vorteil dieses Konditionierungsvorgangs ist der einfache Aufbau des Konditionierungskreises und die einfache Durchführung der Konditionierung. Ergebnis und Verlauf der Konditionierung hängen dabei stark von den Konditionierungskreisparametern ab. Durch die Verwendung eines Vorwiderstands kann eine Dekonditionierung verhindert werden. Dieser darf aber nicht zu groß gewählt werden, da sonst der Konditionierungsprozess unnötig in die Länge gezogen wird und sich bei sehr kleinen Stromstärken ($2\text{ }\mu\text{A}$ - $5\text{ }\mu\text{A}$) Mikronadeln bilden. Diese fungieren als Elektronenemitter und senken somit die Durchschlagspannung. Gleichzeitig muss die gesamte Kapazität möglichst geringgehalten werden, da sich jede zusätzliche Kapazität bei einem Durchschlag entlädt und potentiell dekonditionierend wirkt. Die Anzahl der benötigten Durchschläge bis zum Endkonditionierungsstand ist ebenfalls von dem Konditionierungskreis abhängig und kann im Bereich 15 bis über 200 liegen. Bei dieser Art der Konditionierung und einer inhomogenen Feldverteilung muss beachtet werden, dass die Stelle, an der die Konditionierung stattfindet, „wandert“. Als erstes wird die Stelle konditioniert, an der die Feldstärke am höchsten ist. Wenn während des Konditionierungsvorgangs in diesem Bereich eine bestimmte Feldstärke $E_{k,\min}$ unterschritten wird, wird eine andere Stelle konditioniert, an der die Feldstärke noch über $E_{k,\min}$ liegt. Aus diesem Grund müssen bei der Entwicklung von Vakuumschaltröhren auch Bereiche beachtet werden, die eine geringere Feldbelastung haben [Bal93] [Pso14] [Sla08].

2.2.5 Stromkonditionierung

Diese Konditionierung eignet sich besonders für Vakuumschaltröhren, da ein Schaltvorgang erforderlich ist. Dabei fließt durch den geschlossenen Kontakt ein Strom im Bereich von einigen hundert Ampere. Der Schalter wird dann geöffnet und stromlos wieder geschlossen. Nach ca. 60 - 80 Schaltvorgängen ist der Konditionierungsvorgang abgeschlossen. Der Nachteil dieser Methode ist, dass der Konditionierungsvorgang sehr lange dauert und aufwendig ist, da nach jedem Schaltvorgang die Stehspannung ermittelt werden muss. Ein Vergleich von Konditionierungsvorgängen mit unterschiedlichen Stromstärken ist in Abbildung 2-7 gegeben [Sla08].

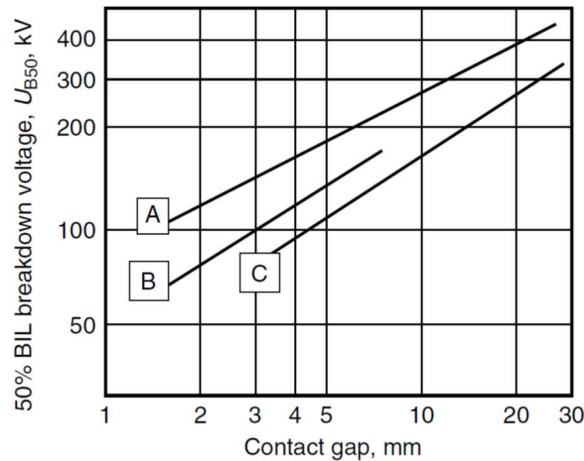


Abbildung 2-7: Vergleich von Durchschlagskonditionierung (C) mit Stromkonditionierung (A: 20 kA, 10 Schaltvorgänge, B: 5 kA, 10 Schaltvorgänge) [Sla08]

2.2.6 Konditionierung mit stromstarken Entladungen

Bei dieser Art der Konditionierung kann die teilweise hohe Anzahl der Durchschläge und damit die lange Konditionierungszeit erheblich reduziert werden. Der Lichtbogen hat dabei eine Stromstärke $I \geq 3$ kA. Durch die hohe Stromstärke wird die Kontaktfläche stärker erodiert, was zu einer größeren Streuung bei den Durchschlagspannungen führt. Bei dieser Konditionierungsart wird die Entladung durch einen LC-Schwingkreis erzeugt. Aufgrund dieser Erzeugung sind die Entladungen sehr hochfrequent (7 kHz), so dass innerhalb einer kurzen Zeit viele Lichtbögen zünden. Wenn ein Lichtbogen zündet, wird dieser im Nulldurchgang durch die Eigenschaft der Vakuumstrecke verlöschen (Nullpunktlöscher), und der Elektronenemitter wird deaktiviert. In der darauf folgenden nächsten Halbwelle kann sich dann ein neuer Durchschlag an einem anderen Elektronenemitter bilden. Die Konditionierung ist dann beendet, wenn sich ein Gleichgewicht zwischen konditionierenden und dekonditionierenden Durchschlägen einstellt [Bal93] [Sla08].

Die Konditionierung erfolgt durch einen intensiven Ionenbeschuss, bei dem die Kontaktoberfläche angeschmolzen und geglättet wird. Dadurch ist es möglich, die Kontaktflächen in der Tiefe zu entgasen. Auch hier ist die Konditionierung von den Kreisparametern abhängig [Bal93].

2.3 Vakuumschaltröhren

In dieser Arbeit wird das Konditionierungsverhalten an einer inhomogenen Feldverteilung untersucht. Die untersuchten Prüfkörper sind Modelle von Metалldampfschirmen. Der Metалldampfschirm ist eine sehr wichtige Komponente moderner Vakuumschaltröhren. In Hochspannungsschaltröhren sind sogar mehrere verbaut. In diesem Kapitel wird auf die Vakuumschaltröhre und ihre Bestandteile eingegangen. Abbildung 2-8 zeigt ein Schnittbild einer 12-kV-Vakuumschaltröhre mit ihren wichtigsten Bestandteilen.

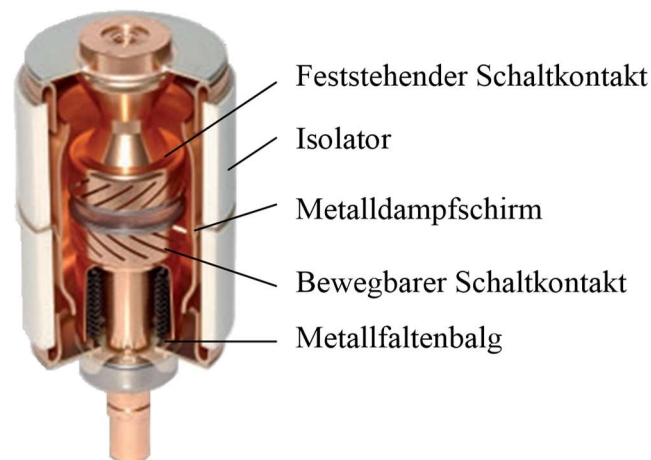


Abbildung 2-8: Schnittmodell einer 12-kV-Vakuumschaltröhre nach [Sie07]

Eine heutige Vakuumschaltröhre besteht aus einem isolierenden Keramikzylinder, der für die Isolation zuständig ist. Der Innenruck beträgt $10^{-7} - 10^{-9}$ bar. Im Inneren der Vakuumschaltröhre ist ein Metалldampfschirm aus Kupfer angebracht. Dieser wird unter Vakuum mit den Al_2O_3 -Keramiken verlötet. Er sorgt dafür, dass sich der Metалldampf, der bei einem Lichtbogen zwischen den Kontakten entsteht, nicht auf der Keramik niederschlägt und so die Isolierstrecke verkürzt oder sogar kurzschließt. Alternative Bauformen von Vakuumschaltröhren haben keine Metалldampfschirme, besitzen dafür aber ein metallisches Mittelteil zwischen den Keramiken. Der entstehende Metалldampf kondensiert dann auf dem Metallteil und beeinträchtigt nicht die Isolation der Keramik. Der Metалldampfschirm wirkt sich auch indirekt auf das Rückzündungsverhalten der Röhre aus. Er entzieht dem Plasma Wärme, wodurch sich die Rekombinationsrate ändert. Verringert man den Abstand zwischen Schirm und Kontakten, verschlechtert sich das Abschaltvermögen. Je

größer der Kontaktabstand ist, desto größer ist der Einfluss des Schirms auf das Abschaltvermögen. Grund dafür ist, dass der zwischen Kontakt und Schirm fließende Emissionsstrom mit steigendem Kontaktabstand zunimmt [Ste08].

Die wichtigste Komponente einer Vakuumschaltröhre ist der Schaltkontakt, der durch den Lichtbogen einer sehr hohen Belastung ausgesetzt ist. Er setzt sich aus einem Kupferträger und einem abbrandfesten Bereich für den Lichtbogen zusammen. Der Schaltkontakt sorgt durch seine geometrische Gestaltung und die Materialauswahl seiner Komponenten für eine sichere Beherrschung des Schaltlichtbogens. Die Oberfläche des Schaltkontaktes ist durch den Lichtbogen Temperaturen im Bereich von 4000 – 5000 K ausgesetzt. Damit der Kontakt diesen Belastungen widersteht, muss er aus einem geeigneten Werkstoff bestehen und geometrisch so aufgebaut sein, dass er durch gezielte Ausbildung eines Magnetfeldes eine Kontraktion des Lichtbogens verhindert oder der Fußpunkt des Lichtbogens nicht an einer Stelle des Kontakts dauerhaft stehen bleibt [Del08].

An den Kontaktwerkstoff werden viele verschiedene Anforderungen bezüglich elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, Verschweißneigung, Sprödigkeit und Härte gestellt. Diese widersprechen sich teilweise. Aus diesem Grund werden meist Legierungen benutzt. Sie bestehen aus einem warmfesten Gerüstmetall wie Chrom oder Wolfram mit einem leitfähigen Tränkstoff aus Kupfer. Durch die einheitliche Kornform und Korngröße der Gerüstmetalle entsteht ein relativ harter Werkstoff mit glatter Oberfläche. Dies wirkt sich positiv auf das Abbrandverhalten des Kontaktes aus. Durch das Kupfer bekommt der Kontakt eine gute thermische und elektrische Leitfähigkeit [Lip03].

Der Schaltkontakt ist so aufgebaut, dass nicht nur der Lichtbogen ohne übermäßigen Abbrand getragen werden kann, sondern auch die Kontaktgeometrie das Plasmaerscheinungsbild beeinflusst. Dadurch ist es möglich, den Lichtbogen diffus zu halten (Axialmagnetfeldkontakt) oder ihn zum Rotieren zu bringen, so dass sich die thermische Belastung über den gesamten Kontakt verteilt (Radialmagnetfeldkontakt [Lip03] bzw. Transversalmagnetfeldkontakt [Pie14]).

Die in Abbildung 2-9 dargestellte Vakuumschaltröhre ist für die 12-kV-Spannungsebene ausgelegt. Vakuumschaltröhren für höhere Spannungen benötigen bedingt durch ihre größeren Abmessungen eine Feldsteuerung. Dies kann durch weitere Metaldampfschirme erfolgen, die ein schwebendes Potential haben. Wenn eine Spannung an den Kontakten

Hackam hat in seiner Abhandlung eine Reihe von Einflüssen untersucht. Neben dem Konditionieren beschäftigte er sich auch gezielt mit dem Dekonditionieren. Er führte dabei Untersuchungen an einer Platte-Platte-Anordnung aus Silber mit einem Abstand von 0,02 mm – 7,1 mm durch. Neben dem reinen Vakuumdurchschlag hat er auch das Verhalten bei verschiedenen Drücken unter Luft und Wasserstoff untersucht. Dabei veränderte Hackam die elektrischen Parameter des Konditionierungskreises. Er hat Strombegrenzungswiderstände und Kapazitäten parallel zur Vakuumdurchschlagstrecke variiert und außerdem überprüft, wie sich das jeweils auf das Konditionierungsverhalten auswirkt. Er variierte die Strombegrenzungswiderstände im Bereich 1 M Ω – 10 M Ω und die Parallelkapazitäten im Bereich 10 nF – 500 nF. Diese Untersuchungen führte er bei Gleichspannung und Wechselspannungen im Frequenzbereich 50 Hz – 450 Hz durch. Er kam dabei zu folgenden Erkenntnissen [Hac75]:

- Konditionierung mit Wechsel- und Gleichspannung führt zu derselben Spannungsfestigkeit.
- Der Vakuumdurchschlag ist unabhängig von der Art des Gases und dem Gasdruck, wenn der Durchschlag nicht mehr nach dem Townsendmechanismus erfolgt.
- Bis zu einer Frequenz von 250 Hz ist der Durchschlag nicht frequenzabhängig.
- Es gibt eine minimale Energie, die nötig ist, um eine Dekonditionierung herbei zu führen. D. h. es wird eine gewisse Parallelkapazität und ein geringer Stromdämpfungswiderstand benötigt.

Latham hat ein System vorgestellt, bei dem nicht die komplette Elektrode konditioniert wird, sondern Emissionszentren gezielt entfernt werden. Dadurch wird eine versehentliche Dekonditionierung vermieden. Erst werden die Emissionszentren ermittelt, dann wird die Konditionierungsvorrichtung vor dem Emissionszentrum positioniert und diese dann entfernt. Es wurden drei unterschiedliche Systeme untersucht, die dazu in der Lage sind. Beim Argon-Ionen-Ätzen ätzt ein Ionenstrahl das Material weg, beim Elektronenstrahlheizen schmilzt ein Elektronenstrahl die Oberfläche auf und beim „point spark knocking“ wird der Emitter per Lichtbogen entfernt. Die Ergebnisse wurden mit konventionellen Konditionierungsmethoden (Gas und Vorstrom) verglichen. Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass mit der Argon-Ionen-Ätzmethode eine höhere Spannungsfestigkeit erzielt werden kann als mit den konventionellen Methoden. Durch das Elektronenstrahlheizen

wird eine ähnliche Spannungsfestigkeit erreicht. Nur das „point spark knocking“ führte zu einer niedrigeren Spannungsfestigkeit, da eine starke Dekonditionierung bei diesem Verfahren auftritt [Lat88].

Ballat hat das Konditionierungsverhalten an fünfzig 12-kV-Vakuumschaltröhren untersucht. Er untersuchte das Konditionierungsverhalten erst mit der Vorstromkonditionierung und dann mit der Wechselspannungsdurchschlagskonditionierung. Bei der Vorstromkonditionierung ging der Emissionsstrom nicht zurück und führte bei höheren Spannungen zu einer unzulässigen Erwärmung der Vakuumschaltröhre. Bei der darauffolgenden Durchschlagskonditionierung mit Wechselspannung kam es zu einer unsymmetrischen, polaritätsabhängigen Belastung des Prüftransformators, da die Konditionierung vorzugsweise an der Kathode stattfindet. Dadurch ergibt sich ein unterschiedlicher Konditionierungsverlauf für positive und negative Durchschläge bei Wechselspannung. Um dem entgegen zu wirken, wurde ein Stützkondensator in den Kreis eingebaut, der die Prüfspannung symmetriert. Ballats Erkenntnisse sind [Bal93]:

- Die Vorstromkonditionierung ist nicht dazu geeignet, Vakuumschaltröhren zu konditionieren. Die dabei doch auftretende Konditionierung rührt von den Durchschlägen während der Konditionierung her.
- Die zusätzliche Kapazität symmetriert die Spannung, aber bei jedem Durchschlag entlädt sie sich über die Vakuumstrecke und führt so zu einer Dekonditionierung.
- Um die Dekonditionierung zu verhindern, hat Ballat den Einfluss von verschiedenen Strombegrenzungswiderständen untersucht und herausgefunden, dass ab einem bestimmten Widerstandswert die Erhöhung des Widerstandes den Strom nicht weiter reduziert, also die Dekonditionierung nicht weiter verringert wird.
- Bei der Durchschlagskonditionierung ist nur die Anzahl der Durchschläge für die Konditionierung verantwortlich, nicht die Zeitdauer, für die die Spannung anliegt.

Shioiri hat den Zusammenhang zwischen der Konditionierung und der effektiven Elektrodenoberfläche (Fläche, an der die Feldstärke $E \geq 0,9 E_{\max}$ ist) untersucht. Er verwendete Stab-Stab- und Platte-Platte-Elektrodenanordnungen mit einem Abstand von 1,5 mm und verschiedenen Durchmessern mit einer Wechselspannung, die jeweils für eine Dauer von 50 ms anlag. Er fand heraus, dass die Konditionierungszeit proportional

zur effektiven Elektrodenoberfläche und die Spannungsfestigkeit nach der Konditionierung antiproportional dazu ist [Shi95].

Danikas untersuchte den Ansatz von Shioiri weiter und zeigte, dass das Konditionieren nicht nur von der Elektrodenfläche abhängt, sondern sich mit der Fläche auch das Volumen und damit auch die Eigenkapazität ändert. Seiner Meinung nach bestimmt die Änderung der Kapazität das Konditionierungsverhalten [Dan96].

Schümann widmete sich auch diesem Thema. Er untersuchte, inwieweit sich die zusätzliche Kapazität durch Metaldampfschirme auf das Konditionierungsverhalten auswirkt. Er untersuchte dabei, ob die effektive Elektrodenoberflächenänderung oder die dadurch veränderte Kapazität das Konditionierungsverhalten beeinflussen. In seinem Experiment konnte er durch Hinzufügen und Entfernen von Elektroden die effektive Fläche ändern und mit dem Abstand die Kapazität einstellen. Er variierte die effektive Fläche im Bereich $7 \text{ cm}^2 - 78 \text{ cm}^2$, die Kapazität im Bereich $2,5 \text{ pF} - 17 \text{ pF}$ und den Abstand im Bereich $5 \text{ mm} - 15 \text{ mm}$. Er kam zu dem Ergebnis, dass sich die Kapazitätsveränderung nicht auf das Konditionierungsverhalten auswirkt [Sch04].

LanJun hingegen benutzte Parallelkapazitäten, um 10-kV-Vakuumschaltröhren gezielt zu konditionieren. Durch die Parallelkapazität wollte er den Strom einstellen, um so eine feine Korngrenzschicht zu erzeugen. Er kam zu der Erkenntnis, dass der Konditionierungsvorgang dadurch verbessert wird [Lan99].

Inagawa wollte herausfinden, wie sich Oberflächenparameter, wie z. B. Rauheit, auf den Konditionierungsprozess auswirken. Er verwendete in seinen Untersuchungen negative Blitzstoßspannung bei einer Platte-Stab-Anordnung mit einem Abstand von 5 mm. Die untersuchten mittleren Rauheiten lagen im Bereich $R_a = 0,25 \text{ } \mu\text{m} - 1,26 \text{ } \mu\text{m}$. Er kam zu den Ergebnissen, dass die Anzahl der konditionierenden Durchschläge mit der Oberflächenrauheit steigt und dass nach der Konditionierung die Durchschlagsfestigkeit unabhängig von der anfänglichen Oberflächenrauheit ist [Ina04].

Fink und Heil verfolgten einen anderen Ansatz. Sie wollten die Konditionierung an kommerziellen Vakuumröhren mithilfe von hochfrequenten Strömen verbessern. Beide führten Untersuchungen an 24-kV-Vakuumschaltröhren durch und verwendeten dabei einen Strom in Höhe von 10 kA bei einer Frequenz von $75 \text{ kHz} - 100 \text{ kHz}$. Der Strom wurde

durch einen Resonanzschwingkreis erzeugt, und der Lichtbogen brannte für ca. 800 μs zwischen den Kontakten. Laut Fink konnte die Konditionierungszeit verkürzt und mit einer längeren Konditionierungsdauer eine höhere Spannungsfestigkeit erreicht werden. Nachteilig war aber, dass mit steigender Spannungsfestigkeit der Resonanzkreis verstimmt wurde und die Resonanzfrequenz nach ca. zwei Konditionierungsimpulsen wieder neu eingestellt werden musste. Es wurden auch einige Annahmen untersucht, mit denen aus dem anfänglichen Konditionierungsverlauf die endgültige Spannungsfestigkeit ermittelt werden sollte [Fin06] [Hei06].

Kato hat nicht den Konditionierungsprozess an sich untersucht, sondern die unterschiedlichen Verfahren der Durchschlagskonditionierung, mit der ein Konditionierungsverlauf erstellt wird. Er verglich den Konditionierungsverlauf an einer Platte-Stab-Anordnung mit einem Kontaktabstand von 5 und 10 mm bei der „Up and Down“-Methode und bei der Spannungssteigerungsmethode. Seine Arbeit zeigt, dass die Spannungsfestigkeit nach dem Konditionieren unabhängig von der Methode der Durchschlagskonditionierung ist, aber die „Up and Down“-Methode 3-mal so lange dauert. Er hat auch gezeigt, dass die Oberfläche durch die „Up and Down“-Methode weniger stark zerstört wird als mit der Spannungssteigerungsmethode [Kat06].

Fukuokas Arbeit handelt vom Konditionierungsverhalten bei verschiedenen Kontaktabständen im Bereich 2 mm – 50 mm einer Stab-Platte-Anordnung mit unterschiedlichen Radien am Ende der Stabelektrode. Sein Fokus lag auf der Feldstärke beim Konditionieren und wie diese sich dabei verändert. Dabei beobachtete er, dass der Ort der Durchschläge auf der Stabelektrode vom konditionierten Bereich zum unkonditionierten wandert. Er kam zu dem Ergebnis, dass die Durchschlagsfeldstärke nach dem Konditionieren unabhängig von Kontaktabstand und unabhängig vom Stabradius ist [Fuk07].

Yingyao untersuchte das Konditionierungsverhalten in Abhängigkeit von der effektiven Kontaktoberfläche. Er beschrieb auch einen Konditionierungskoeffizienten für den Konditionierungsvorgang zur besseren Vergleichbarkeit von Konditionierungsvorgängen. Er benutzte dazu eine Platte-Platte-Anordnung mit einem Kontaktabstand von 6 mm, und er konnte die effektive Fläche im Bereich von 221 mm² - 550 mm² variieren. Als Spannungsform benutzte er eine Normblitzstoßspannung. Seine Erkenntnisse waren, dass der

Konditionierungsprozess umso länger dauert, je größer die effektive Fläche ist. Die Spannungsfestigkeit sinkt nur gering, auch wenn die effektive Fläche stark vergrößert wird [Yin09].

Kojima hat bei seinen Untersuchungen mit einer Platte-Platte-Anordnung und einem Abstand von 5 mm herausgefunden, dass sich während des Konditionierungsvorganges Anodenmaterial auf der Kathode niederschlägt [Koj10].

Yang hat sich auch dem Thema „Konditionieren mit hochfrequenten Impulsen“ gewidmet. Er arbeitet mit 7,2-kV-Vakuumschaltröhren mit einem Kontaktabstand von 0,8 mm. Sein Stoßkreis erzeugt jeweils 100 Spannungsimpulse mit der Frequenz von 1000 Hz. Er konnte mit seinem Kreis die Spannungsfestigkeit erhöhen und die Streuung der Messergebnisse verkleinern [Yan12].

Kojima hat genauso wie Kato die unterschiedlichen Verfahren der Durchschlagskonditionierung erforscht. Er hat bei einem Kontaktabstand von 5 mm bei einer Platte-Stab-Anordnung mit negativer Blitzstoßspannung die „Up and Down“-Methode mit seiner „3-times“-Methode (Spannung wurde erhöht, wenn der Prüfling drei Spannungsbeanspruchungen ohne Überschläge gehalten hat) verglichen. Seine Elektroden bestanden aus Edelstahl und Kupfer. Bei den Edelstahlelektroden wurde mit beiden Methoden die gleiche Spannungsfestigkeit erreicht, aber die Konditionierung erfolgte schneller mit der „3-times-Methode“. Bei der Kupferelektrode war die Spannungsfestigkeit mit der „3-times-Methode“ geringer [Koj14].

Takahashi untersuchte den Einfluss der umgesetzten Ladung bei einem Durchschlag. Er arbeitete mit einer Platte-Stab-Anordnung mit einem Abstand von maximal 50 mm. Er kam zu der Erkenntnis, dass mit steigender Ladung die dielektrische Festigkeit verbessert wird, sich ab einem gewissen Wert aber wieder verschlechtert [Tak15].

3 Ziele der Arbeit

Vakuumschalttechnologie gibt es schon seit 125 Jahren. Dennoch ist sie immer noch ein aktuelles Thema, da erst seit ca. 15 Jahren versucht wird, den Vakuumschalter hochspannungstauglich ($U_s \geq 72,5 \text{ kV}$) zu machen. Bis heute gab es jedoch keinen nennenswerten Durchbruch [Fal04] [Sme14].

Die ersten Hochspannungsvakuumschalter wurden schon 1968 gebaut. Damals wurden acht Mittelspannungsvakuumpatronen in Reihe geschaltet, um so in der 132-kV-Ebene zu arbeiten. Es wurden einfachunterbrechende Vakuumschaltpatronenprototypen bis zu einer Spannungsebene von 145 kV gebaut sowie Vakuumschalter, die aus mehreren Vakuumschaltpatronenprototypen bestanden und die bis zu einer Spannungsebene von 204 kV arbeiten. Gleichzeitig wurden Konzepte erstellt, die zeigen sollten, dass die Vakuumschalttechnik bis in die 550-kV-Ebene eingesetzt werden kann [Sme14]. Um die Jahrtausendwende gab es nochmals einen weiteren Impuls für die Hochspannungsvakuumschalttechnik durch das Kyoto-Protokoll. Zur Vermeidung von Treibhausgasen wie SF_6 sollte die SF_6 -Schalttechnik durch die Vakuumschalttechnik soweit wie möglich ersetzt werden. Es wurden Prototypen für die 252-kV-Ebene (einfach unterbrechend) und bis zur 765-kV-Ebene (mehrfach unterbrechend) vorgestellt. Derzeit (Stand 2014) sind kommerzielle Produkte auf dem Markt für die 145-kV-Ebene (einfach unterbrechend) und 204-kV-Ebene (zweifach unterbrechend). Diese befinden sich vereinzelt im Netz. Der Großteil (99 %) der verwendeten Hochspannungsvakuumschalter wird in der 72,5- und 84-kV-Ebene eingesetzt und ist im asiatischen Raum installiert. In anderen Regionen wie Europa und den USA finden sich Hochspannungsvakuumschalter nur in Pilotprojekten. Grund dafür ist, dass es noch nicht genügend Praxiserfahrung gibt und Hochspannungsvakuumschalter unter Laborbedingungen nicht wirklich überzeugen konnten. Ein weiterer Grund ist auch, dass der Einsatz von Vakuumschaltern in der Hochspannungsebene teurer ist als der Einsatz von SF_6 -Schalttechnik [Sme14].

Damit die Vakuumschalttechnik effektiv und kostengünstig in der Hochspannungsebene eingesetzt werden kann, müssen neue Hochspannungsvakuumschaltpatronen entwickelt werden. Dabei ist der Konditionierungsvorgang ein essentieller Bestandteil. Wie in Kapitel 2.4 erläutert, existieren viele unterschiedliche Ansätze zum Thema Konditionieren.

Eine klare Richtung ist jedoch nicht erkennbar. Werden die vorhandenen Arbeiten verglichen, so wird deutlich, dass einige Autoren sich mit sehr speziellen Themen beschäftigen ([Bal93], [Lat88], [Shi95]), andere aber sehr grundlegende Sachverhalte untersucht haben ([Shi95], [Kat06] [Yin09]). Teilweise widersprechen sich auch einige Arbeiten ([Shi95], [Dan96], [Sch04], [Lan99]) oder bleiben sehr allgemein ([Tak15] [Lan99]).

Der Grund hierfür ist, dass sich die Vakuumschalttechnik im Niederspannungs- und Mittelspannungsbereich schon über Jahre etabliert hat. Ein Einsatz für die Hochspannungsebene durch eine einfache Erhöhung des Kontaktabstandes ist ohne Weiteres nicht möglich. Es hat sich herausgestellt, dass viele grundlegende Aspekte genau untersucht werden müssen, da diese im Hochspannungsbereich abweichend sind.

In der Anfangszeit wurde im Bereich der Vakuumschalttechnik viel geforscht. Es liegen unzählige Veröffentlichungen vor über den Einfluss des Kontaktmaterials, die Elektrodenform und -größe, und es wurden diverse Modelle zu den Durchschlagsmechanismen im Vakuum aufgestellt. Aufgrund des problemlosen Einsatzes des Vakuumschalters bei kleinen Spannungen ($U_s < 40,5 \text{ kV}$) wurde fast die komplette Forschung aus hochspannungsseitiger Sicht nur bei kleinen Kontaktabständen durchgeführt. Je nach Autor lagen „große“ Kontaktabstände dann im Bereich von 1 mm – 3 mm. Heute liegen die Kontaktabstände im Mittelspannungsbereich bei Vakuumschaltröhren im Bereich von 10 mm – 20 mm. Dadurch, dass die Spannungsfestigkeit bei größeren Kontaktabständen nur noch gering mit steigendem Kontaktabstand steigt, benötigen Hochspannungsvakuumschaltröhren überproportional größere Abstände (z. B. in der 72,5-kV-Ebene ca. 40 mm). Diese Abstände sind sehr weit weg von den Bereichen, in denen Untersuchungen bisher durchgeführt wurden. Ein Großteil der Erkenntnisse ist auch auf große Kontaktabstände anwendbar, aber erste Untersuchungen an Hochspannungsvakuumschaltröhren haben gezeigt, dass ihr Verhalten abweichend von Vakuumschaltröhren für kleinere Spannungen ist. Durch die größeren Kontaktabstände ergeben sich andere Feldstärken und auch andere Beschleunigungsstrecken für Partikel. Durch die größeren Kontaktabstände wird auch die gesamte Vakuumschaltröhre größer, was zu veränderten Streukapazitäten und zur Notwendigkeit einer Feldsteuerung führt. Die Feldsteuerung wird durch mehrere Metaldampfschirme realisiert (siehe Kapitel 2.3). Durch die Metaldampfschirme ergeben sich völlig neue dielektrische Verhältnisse in der Röhre. Neben den zusätzlichen Bauteilen, bei denen man auf die Geometrie und die Materialparameter

achten muss, entstehen auch neue Tripelpunkte, welche die dielektrische Festigkeit beeinflussen. Es ergeben sich auch andere Feldverhältnisse im Gegensatz zu Vakuumschaltröhren mit nur einem Schirm. Neben dem reinen Überschlagsort zwischen den Kontakten können nun auch nichtgewollte Überschläge zwischen Kontakt und Schirm oder zwischen zwei Schirmen stattfinden. Diese müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

Vakuumschaltkontakte wurden über Jahrzehnte hin systematisch optimiert. Metaldampfschirme wurden jedoch nur „nebensächlich“ behandelt, da sie die Schaltfunktion nicht beeinflussen. Durch die notwendige Feldsteuerung und die zusätzliche Anzahl von Metaldampfschirmen werden diese aber immer wichtiger. Anhand von Dampfschirmmodell-Anordnungen sollen solche inhomogenen Feldverteilungen in dieser Arbeit untersucht werden. Durch die Verwendung von Metaldampfschirmmodellen werden nicht nur Effekte der inhomogenen Feldverteilung, wie das „Wandern“ der Konditionierung oder extreme Feldstärken an einzelnen Stellen untersucht, sondern auch weitere Effekte (Tripelpunkte, Fertigungstoleranzen, bauteilspezifische Geometrien, ...), die in Vakuumschaltröhren vorkommen können.

Ein Großteil der Untersuchungen hat bisher nur bei relativ kleinen Kontaktabständen stattgefunden. Das spiegelt sich auch in der Methodik wider. Es gibt zurzeit kein einheitliches Vorgehen, wie die maximale Spannungsfestigkeit einer Vakuumelektrodenanordnung ermittelt wird. Da bei kleinen Spannungen die Streuung nur sehr gering ist, war das auch nicht nötig. Bei größeren Abständen wird die Streuung durch Konditionierung und Dekonditionierung jedoch immer höher. Bei dielektrischen Messungen mit einem Kontaktabstand von 40 mm konnten je nach Konditionierungsgrad Spannungsfestigkeiten zwischen 200 kV und 500 kV festgestellt werden [Pso14]. Auch bei der Konditionierung gibt es keine einheitlichen Vorgehensweisen, wie eine Vakuumelektrodenanordnung konditioniert wird und festgestellt werden kann, wann die Konditionierung beendet ist, oder wie „gut“ der Konditionierungsverlauf ist. Bei kommerziellen Vakuumschaltröhren war das auch nie nötig, da diese nicht auf maximale Spannungsfestigkeit hin konditioniert werden, sondern auf das Halten der normativ geforderten Stehspannung.

Um grundsätzliche Untersuchungen von Vakuumelektrodenanordnungen in der Hochspannungsebene durchzuführen, muss zunächst eine Methodik entwickelt werden, mit der überprüft werden kann, wie hoch die maximale Spannungsfestigkeit ist. Dazu gehört auch

zwangsläufig die nähere Betrachtung des Konditionierungsverhaltens, da dieser Effekt andere Designparameter (Material, Geometrie, Temperatur, ...) dominiert.

Die Arbeit soll anhand von Dampfschirmmodellen zeigen, wie schon nach einer relativ geringen Anzahl von Überschlügen Messergebnisse vorliegen, die sinnvoll weiterverarbeitet werden können, z. B. welche von zwei unterschiedlichen Geometrien eine höhere Spannungsfestigkeit aufweist. Hierbei soll gezeigt werden, wie sich Änderungen der Parameter des elektrischen Prüfkreises auf das Konditionierungsverhalten auswirken und wie diese gewählt werden sollten, um verwertbare Messergebnisse zu erhalten die weiterverwendbar sind. Dazu sollen Methoden aufgezeigt werden, mit denen der Konditionierungsverlauf vergleichbar und bewertbar ist, und die Aussagen dazu erlauben, ob die Konditionierung beendet ist. Des Weiteren sollen Ansätze vorgestellt werden, die zeigen, ob die maximale Spannungsfestigkeit schon während des Konditionierungsvorgangs vorhergesagt werden kann.

Die Arbeit soll dabei auch die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen untersuchen und dadurch allgemein zu einem besseren Verständnis des Vakuumdurchschlags führen.

Aus den Zielen der Arbeit ergibt sich folgende Struktur. In dem folgenden Kapitel werden die Prüfkörper und deren Herstellung vorgestellt. Danach werden die Prüfkreise und der Prüfablauf erläutert. Kapitel 6 beschäftigt sich mit den experimentellen Untersuchungen. Hier werden die Messergebnisse der dielektrischen Prüfungen sowie die Auswertung der herstellungsbedingten Abweichungen gezeigt. In Kapitel 7 werden die Feldsimulationen für die verschiedenen Prüfkörper und die auftretenden herstellungsbedingte Abweichungen vorgestellt. Anschließend werden die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse näher betrachtet, und am Ende erfolgt eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf noch offene Fragestellungen.

4 Prüfkörper

Die in dieser Arbeit verwendeten Prüfkörper sind Modellanordnungen von Metaldampfschirmen im Vakuum, wie sie in Zukunft in Hochspannungsvakuumschaltröhren zum Schutz der Keramik vor Metaldampfablagerung und zur Feldsteuerung vorgefunden werden könnten. Die Prüfkörper werden mit denselben Verarbeitungsschritten gefertigt wie industriell genutzte Vakuumschaltröhren. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der hier auftretenden Effekte auch bei handelsüblichen Vakuumschaltröhren auftreten. Die Metaldampfschirme sind auf den ersten Blick Stellen mit inhomogenen Feldverteilungen, was zu einer grundsätzlichen Verschlechterung der dielektrischen Festigkeit führt. Neben der inhomogenen Feldverteilung verursachen mehrteilige Metaldampfschirme jedoch auch andere Effekte, welche die dielektrische Festigkeit beeinflussen. Um diese Einflüsse genauer zu untersuchen, lag der Fokus in dieser Arbeit nicht bei optimierten Kontaktformen oder realitätsfremden Laboraufbauten. Dadurch beinhalten die Untersuchungen neben Einflüssen durch Kontaktabstand und -form auch Effekte, die durch die Anwesenheit der Keramik bedingt sind, wie ein über den gesamten Umfang verteilter Tripelbereich, hohe Feldbelastung der Keramik, Einfluss von Abweichungen bei der Fertigung in feldmäßig kritischen Bereichen sowie bauteilspezifische Geometrien.

4.1 Aufbau der Prüfkörper

Die Prüfkörper bestehen aus einem isolierenden Zylinder aus Keramik (Al_2O_3) mit einer Wanddicke von 6 mm, welcher eine metallisierte Stirnfläche hat. Über diese metallisierten Flächen werden die Prüfkörper in einem industriellen Fertigungsprozess (d. h. in gleicher Weise wie komplette Vakuumschaltröhren) mit Edelstahlkappen vakuumdicht verschlossen.¹ Der Innendruck der Prüfkörper beträgt danach $p = 10^{-9}$ bar. Abbildung 4-1 zeigt einen solchen Prüfkörper mit seinen Abmessungen.

¹ Dank an das Röhrenwerk Siemens Berlin, das die Prüflinge gefertigt und bereitgestellt hat.

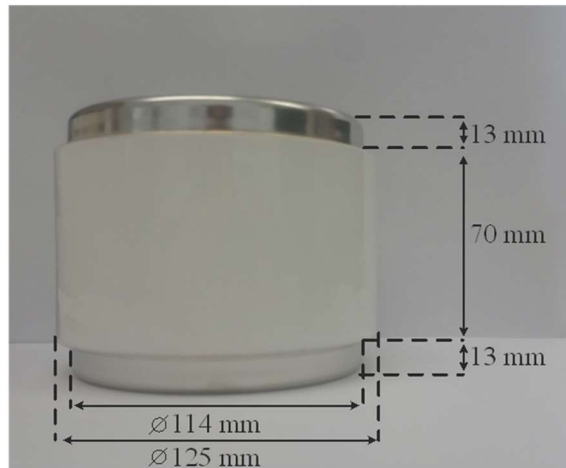


Abbildung 4-1: Prüfkörper mit äußeren Abmessungen

Die Prüfkörper liegen auch noch in einer anderen Variante vor, in der der Isolator nur eine Höhe von 45 mm hat. Die Metaldampfschirme aus sauerstofffreiem Kupfer sind an der metallisierten Seite des Zylinders angelötet. In Abbildung 4-2 ist ein Schnittbild eines Prüfkörpers abgebildet.

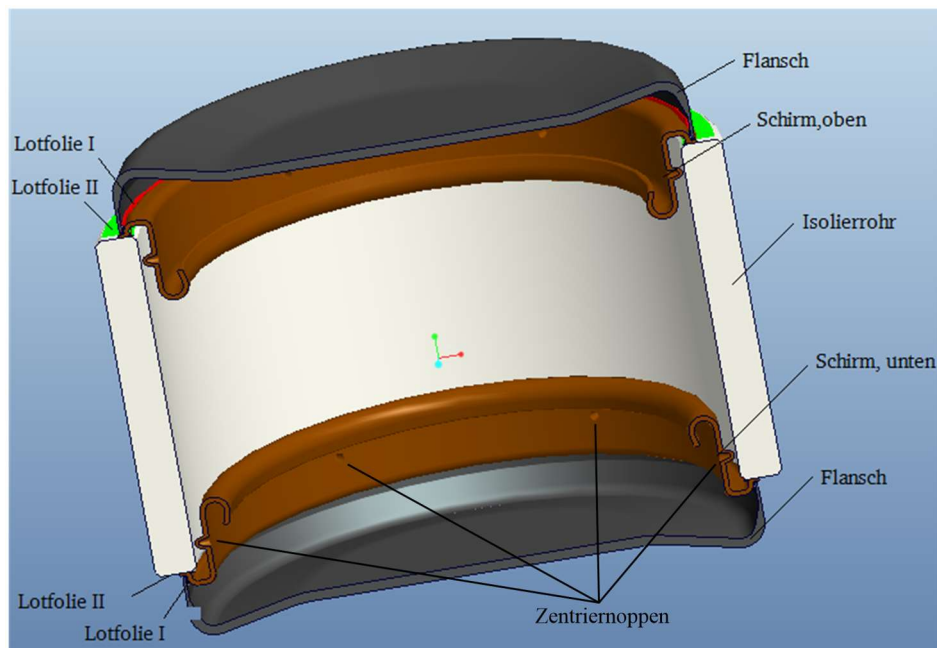

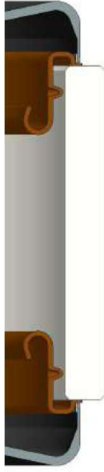

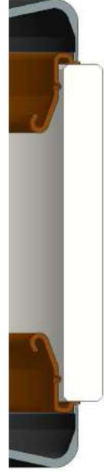


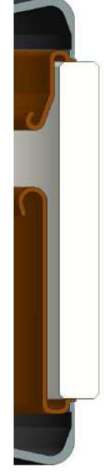
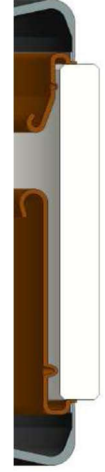


Abbildung 4-2: Schnittbild eines Prüfkörpers (hier mit Metaldampfschirm und Zentriernoppen)

In dieser Arbeit wurden verschiedene Metaldampfschirmvarianten untersucht. Die Varianten unterscheiden sich in der Länge der Schirme, ob sie gekröpft sind und ob sie

Zentriernoppen haben. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Dampfschirmmodelle zusammen mit den zur Kennzeichnung verwendeten Kürzeln.

Tabelle 4.1: Grafische Übersicht der Prüfkörper-Varianten

Kürzel- ken- nung:	KKOXO	KKOXN	KKGXO	KKGXN	KLOXO	KLOXN	KLGXO	KLGXN
Schirm- variante:								

Die Abkürzung der Modelle setzt sich nach folgendem Schema zusammen:

- Die ersten beiden Buchstaben der Kürzel stehen für die obere und untere Schirmlänge (K = kurz, L = lang),
- danach folgt die Kröpfung (G = gekröpft, O = nicht gekröpft),
- X ist ein Platzhalter für die fortlaufende Nummer der Prüfkörper,
- der letzte Buchstabe zeigt an, ob die Schirme Zentriernoppen aufweisen (N) oder nicht (O).

Dadurch lässt sich direkt erkennen, welche Schirmgeometrie sich hinter dem Kürzel verbirgt. Wenn keine weiteren Angaben gegeben sind, beziehen sich die Bezeichnungen in dieser Arbeit immer auf die Variante mit der 70-mm-Keramik. Aus Abbildung 4-3 kann man die Abmessungen der drei verwendeten Dampfschirmmodelle entnehmen.

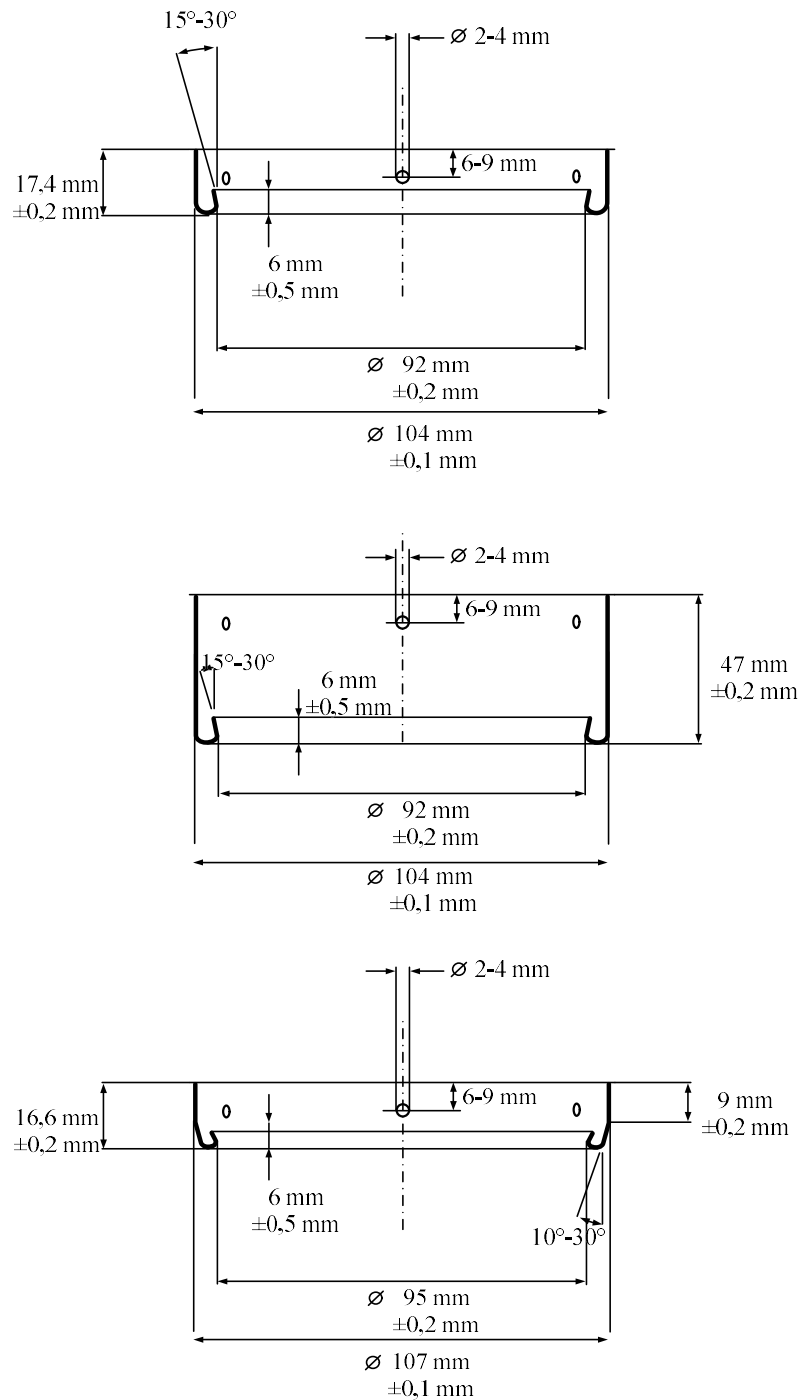


Abbildung 4-3: Schnittbilder der verwendeten Dampfschirmmodelle (Oben: kurz, nicht gekröpft; Mitte: lang, nicht gekröpft; Unten: kurz, gekröpft)

Zusätzlich zu den in der Tabelle angegebenen Schirmvarianten wurden auch Prüfkörper untersucht, die gar keine Metaldampfschirme aufwiesen, um zu sehen, wie sich der reine Tripelpunkt der Metallisierungsfläche (Metall-Keramik-Vakuum) auf das dielektrische

Verhalten der Prüfkörper auswirkt. Bei den Varianten mit dem 45-mm-Isolator gibt es nur die Geometriemodelle KKGXO, KKOXO und Prüfkörper ohne Metaldampfschirm.

Die minimalen Schlagweiten s_{\min} der Prüfkörper sind in Tabelle 4.2 angegeben. Dabei ist es für die Schlagweite unerheblich, ob die Schirme Zentriernoppen aufweisen oder nicht.

Tabelle 4.2: Minimale Schlagweite der verschiedenen Prüfkörper

Isolatorlänge in mm	Prüfkörper	Minimale Schlagweite s_{\min} in mm
70	KKOXO	39,2
	KKGXO	42,8
	KLOXO	14,3
	KLGXO	14,3
45	KKOXO	14,2
	KKGXO	17,8

Die Aufgabe der Zentriernoppen ist es, den Metaldampfschirm beim Verlöten zu zentrieren. Um den kompletten Umfang des Metaldampfschirms sind sechs Zentriernoppen gleichmäßig verteilt. Aufgrund ihrer Funktionsweise haben die Zentriernoppen während des Zusammenbaus der Prüfkörper Kontakt mit der Keramik. Abbildung 4-4 zeigt einen kurzen Metaldampfschirm mit Zentriernoppen.



Abbildung 4-4: Kurzer Metaldampfschirm mit Zentriernoppen (eingerahmt) und Deckel

Bedingt durch die Materialverarbeitung kommt es zu Abweichungen bei Form und Größe der Zentriernoppen. Abbildung 4-5 a) zeigt eine ideale Zentriernoppe, Abbildung 4-5 b) eine Zentriernoppe, die bei der Herstellung des Metaldampfschirms eingedrückt wurde.

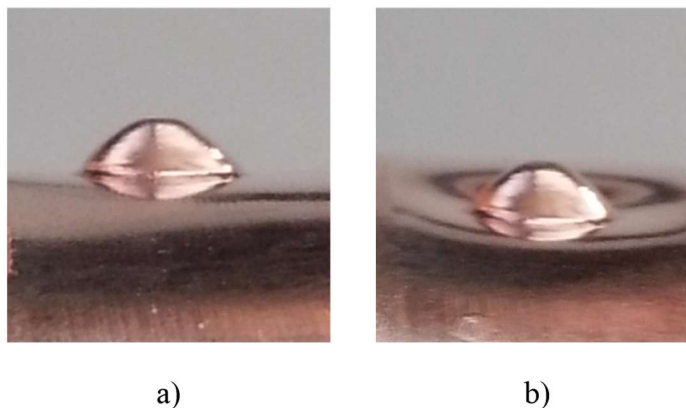


Abbildung 4-5: Zentriernoppe (Position siehe Abbildung 4-4, roter Rahmen) optimale Ausführung (a) und mit fertigungsbedingtem eingedelltem Metaldampfschirm (b)

Die veränderte Form der Noppen führt zu einer veränderten makroskopischen Feldstärke. Die Messungen (Kapitel 6.3.1) haben aber gezeigt, dass die Ursache für einen Durchschlag an den Zentriernoppen die mikroskopische Feldstärke ist. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Arbeit angenommen, dass die Zentriernoppen alle in idealer Form vorliegen.

4.2 Herstellungsverfahren

Ein wichtiger Faktor bei der Herstellung von Vakuumschaltröhren ist der Herstellungsprozess selbst. Schon die kleinsten Verunreinigungen führen zur Verschlechterung des dielektrischen Verhaltens. Aus diesem Grund wurden die Prüfkörper unter denselben Reinraumbedingungen hergestellt wie kommerzielle Vakuumschaltröhren.

Die Metaldampfschirme wurden aus sauerstofffreiem Kupfer gedrückt und anschließend elektropoliert. Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt nach der „Final Seal Brazing“-Methode. Dabei werden alle Teile und die Lotfolie in Position gebracht und anschließend im Vakuumofen verlötet und ausgeheizt. Im Vakuumofen wird als erstes Vakuum gezogen. Anschließend wird die Temperatur gesteigert, bis die Lotfolie schmilzt und damit die Einzelteile vakuumdicht verbindet.

Ein wichtiger Punkt bei diesem Herstellungsprozess ist es, dass die einzelnen Teile sehr genau positioniert werden müssen, bevor sie in den Vakuumofen kommen. Durch die Zentriernoppen soll sich der Metaldampfschirm automatisch zentrieren. Beim Aufheizen

dehnt sich der Metaldampfschirm stärker aus als der Keramikzylinder und zentriert sich dabei.

Die Prüfkörper werden nach ihrem Herstellungsprozess noch bis zu einer Spannung von $U_{AC,eff} = 85 \text{ kV}$ vom Hersteller bei Wechselspannung mit der Durchschlagskonditionierung konditioniert.

5 Prüfaufbau und Prüfablauf

5.1 Prüfaufbau

Die dielektrische Prüfung der Prüfkörper erfolgte in einem mobilen Isoliergefäß, da der Stoßspannungskreis und der Wechselspannungskreis sich in verschiedenen Räumen befanden. Damit die Überschläge ausschließlich innerhalb der Prüfkörper stattfinden, musste ein Versuchsaufbau erstellt werden, der die äußere Überschlagfestigkeit garantiert. Dies wurde durch eine Isolation mit Öl erreicht. Um die Tripelzonen innerhalb und außerhalb des Prüfkörpers zu schirmen, wurden Schirmelektroden aus Messing erstellt. Die Abmessungen lassen sich aus Abbildung 5-1 entnehmen.

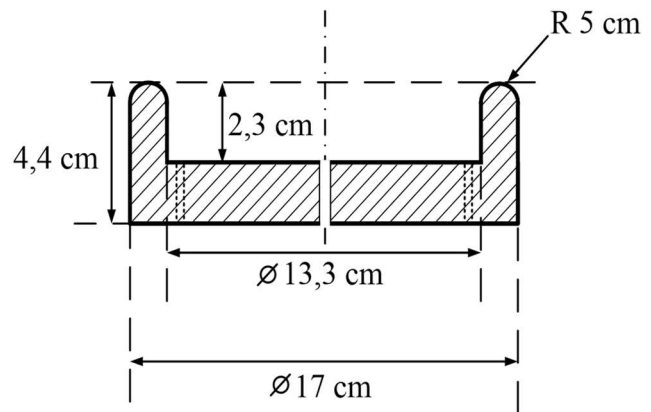


Abbildung 5-1: Schirmelektrode mit Abmessungen

Die drei äußeren Bohrungen in der Elektrode dienen dazu, dass beim Befüllen mit Öl keine Luftblase übrigbleibt und dass das Öl beim Ablassen besser abfließen kann. Die mittlere Bohrung dient als Buchse für die elektrische Kontaktierung.

Um die Feldbeanspruchung zu symmetrieren, wurde der Versuchsaufbau so konzipiert, dass der Prüfkörper in der Mitte des aus Plexiglas bestehenden Prüfgefäßes steht. Ein Foto des Aufbaus und die Abmessungen sind in Abbildung 5-2 zu sehen.

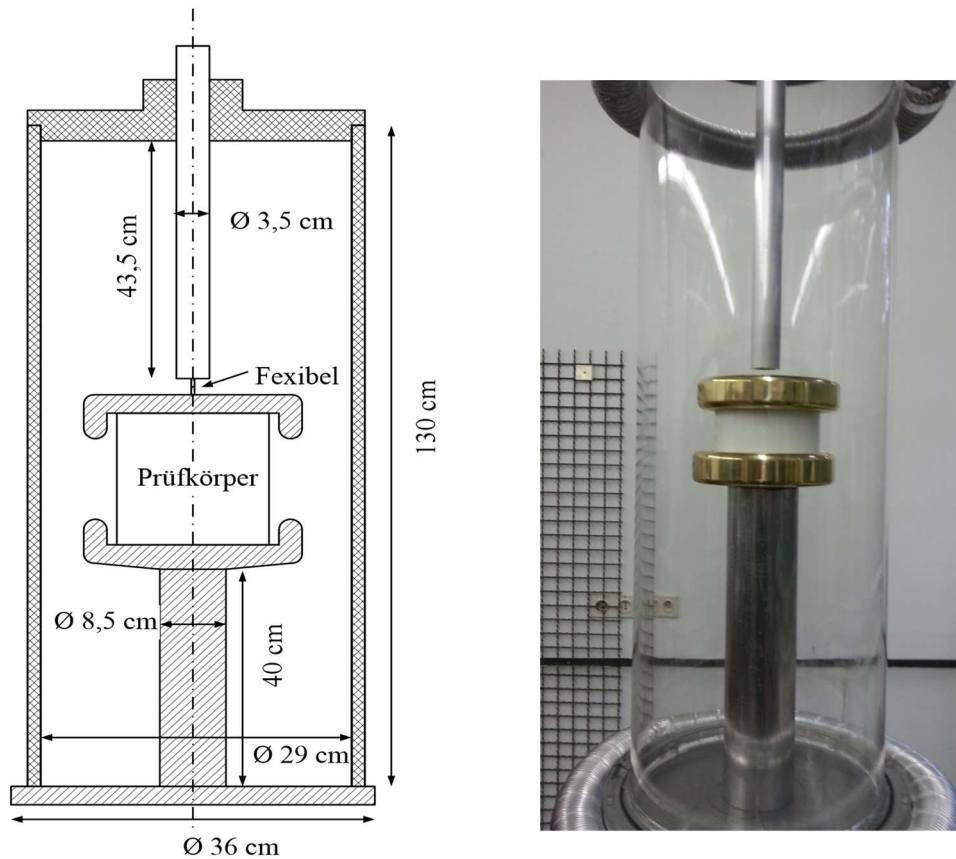


Abbildung 5-2: Versuchsstand mit Abmessungen

Der Versuchstand ist auf einem mobilen Fuß montiert, um so den Einfluss des Bodens auf das elektrische Feld zu kompensieren. Der Boden des Isoliergefäßes ist in einer Höhe von 93 cm über dem Erdboden montiert und die Strommessung ist im Gestell integriert. Die untere Schirmelektrode hat dabei eine Schräge, damit die beim Einfüllen des Öls entstehenden Luftblasen leichter aufsteigen können und sich nicht unter der Elektrode sammeln. Eine Skizze des Aufbaus befindet sich in Abbildung 5-3.

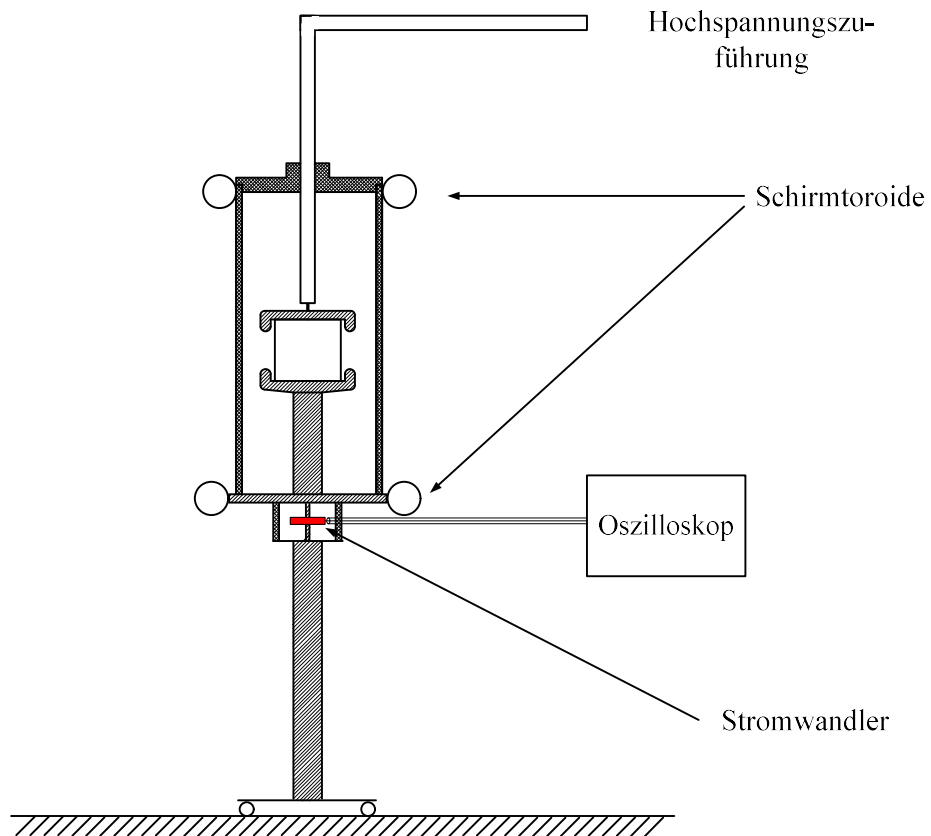


Abbildung 5-3: Prüfaufbau mit fahrbarem Gestell

Ein Schnittbild und Feldbild des Prüfkörpers mit Schirmelektrode befindet sich in Kapitel 7.

5.2 Prüfkreise

Das elektrische Ersatzschaltbild des Prüfkreises für Wechselspannungsmessungen ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

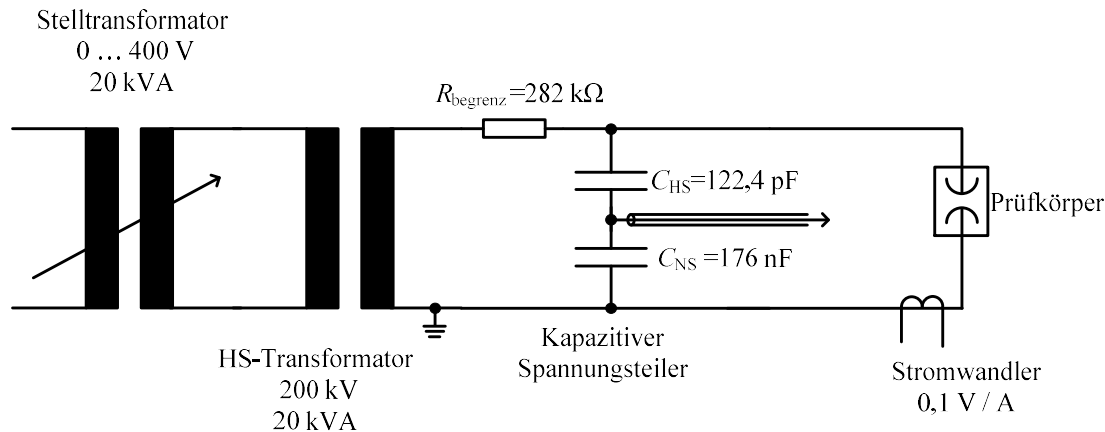


Abbildung 5-4: Ersatzschaltbild für Wechselspannungsprüfungen

Die Spannung wird über einen 20-kVA-Hochspannungstransformator mit vorgeschaltetem Stelltransformator bereitgestellt. Über eine Steuerungselektronik kann die Primärspannung im Falle eines Durchschlags abgeschaltet werden, um unnötige Erosion der Kontakte zu vermeiden. Die Schnellabschaltung überwacht den Strom und sobald dieser einen Wert von ca. 2 A erreicht wird die Spannung nach maximal 100 ms abgeschaltet. Die Strombegrenzung erfolgt resistiv über den Widerstand R_{begrenz} . Die Spannung wird über einen kapazitiven Spannungsteiler mit einem Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} = 1457$ gemessen. In einer anderen Konfiguration des Wechselspannungskreises wurde R_{begrenz} zwischen Spannungsteiler und Prüfling angeordnet, um den Strom aus dem Spannungsteiler zu dämpfen, wenn es zum Durchschlag kam. Dabei ist es unerheblich, ob die Spannungsmessung vor oder hinter dem Strombegrenzungswiderstand erfolgt, da der fließende kapazitive Strom (ca. 200 μA) sehr klein ist. Die dadurch entstehende Spannungsabweichung von ca. 60 V ist vernachlässigbar, da der Fehler $< 0,001 \%$ ist. Der Stromfluss während des Durchschlags wird über einen Pearsonwandler vom Typ Bergoz CT-F0.1 gemessen und auf einem Oszilloskop "LeCroy Wavesurfer 400" angezeigt. Die Bandbreite der Messung beträgt 50 MHz. Bei beiden Prüfkreisen (Wechsels- und Stoßspannung) wurde der Stromwandler hochohmig abgeschlossen.

Die dielektrischen Tests mit Stoßspannungen wurden in einem Prüfkreis nach Abbildung 5-5 durchgeführt.

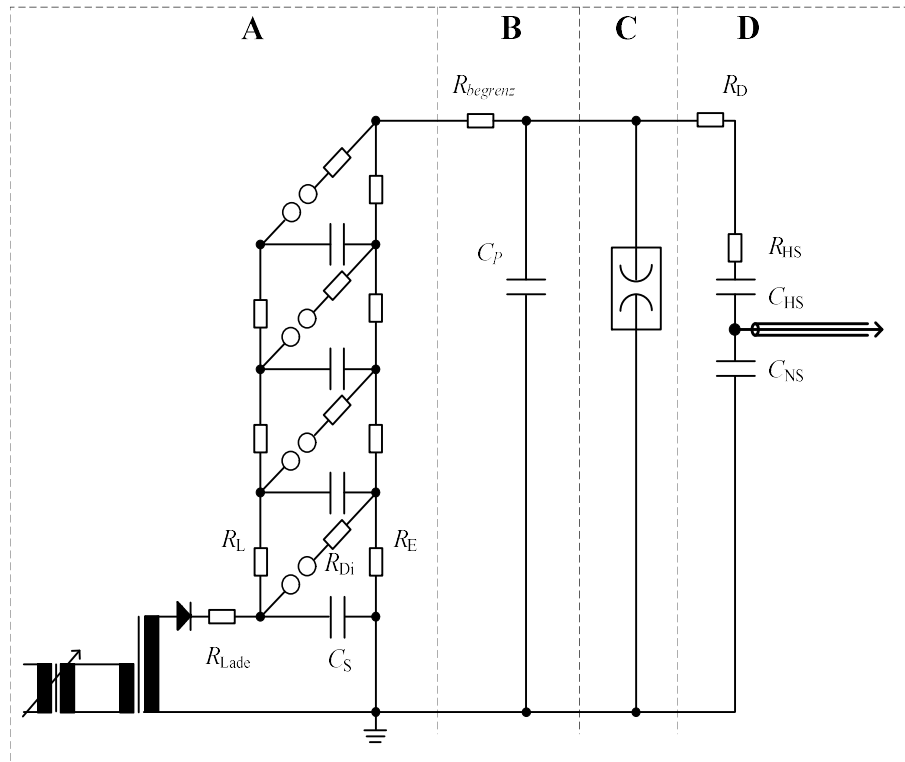


Abbildung 5-5: Stoßspannungsprüfkreis mit Marxgenerator (A), impulsformendem Netzwerk (B), Prüfkörper (C) und kapazitiv gedämpftem Spannungsteiler (D)

Die Spannung wird über einen 4-stufigen Marxgenerator (A) erzeugt. Das zusätzliche externe impulsformende Netzwerk (B) wird dazu benutzt, über den Strombegrenzungswiderstand $R_{begrenz}$ und die Parallelkapazität C_P die Spannungsform und den Strom durch den Prüfling einzustellen. Parallel zum Prüfkörper (C) ist ein gedämpft kapazitiver Spannungsteiler ($\ddot{u} = 2376$) angeschlossen. Die Auswertung erfolgt über einen Highvolt MIAS Impulsanalysator. Die Werte der Bauelemente können Tabelle 5.1 entnommen werden.

Tabelle 5.1: Bauteile des Stoßspannungsprüfkreises

Element	Wert
R_L	19,9 k Ω
R_{Di}	18,8 k Ω
R_E	22 Ω
C'_S	250 nF
$R_{begrenz}$	860 Ω – 50 k Ω
C_P	0 – 1,13 nF
R_D	900 Ω
C_{HS}	250 pF
C_{NS}	546 nF
R_{HS}	350 Ω

Der Marxgenerator hat einen maximalen Energieinhalt von $W = 20 \text{ kJ}$ bei seiner maximalen Stufenladespannung $U = 200 \text{ kV}$ und bei $n = 4$ Stufen. Der Energieinhalt berechnet sich nach Gleichung (5.1).

$$W = \frac{1}{2} C'_s U^2 n \quad (5.1)$$

Über die Elemente des impulsformenden Netzwerkes können Stirnzeit T_1 und Rückenhaltzeit T_2 eingestellt werden. Tabelle 5.2 zeigt die Zeiten zu den entsprechenden Kreisparametern und die dabei entstehenden mittleren Spannungssteilheiten S_A im Anstieg. Diese berechnet sich aus der Stirnzeit T_1 und der mittleren Spannungsfestigkeit für eine Konditionierungskreisconfiguration nach Gleichung (5.2).

$$S_A = \frac{\bar{U}_{\text{KKK}}}{T_1} = \frac{U_{\text{KKK,min}} + \frac{U_{\text{KKK,max}} - U_{\text{KKK,min}}}{2}}{T_1} \quad (5.2)$$

Tabelle 5.2: Zeitparameter für den Stoßspannungsprüfkreis

R_{begrenz}	C_P in nF	T_1 in μs	T_2 in μs	S_A in $\frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$
860 Ω	-	1,2	50	291
18,3 k Ω	-	16	80	21
50 k Ω	-	30	115	10
18,3 k Ω	1,13	34	125	6
50 k Ω	1,13	56	204	4

Die in Tabelle 5.2 genannten Werte ergeben sich zusammen mit der Kapazität der Prüfkörper, die bei $C_{PK} \approx 20 \text{ pF}$ liegt. Der Strom wird auch hier durch den Pearsonwandler im Gestell gemessen und über den Impulsanalysator ausgewertet.

5.3 Prüfablauf

Da der Vakuumdurchschlag sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit des Kontaktes abhängig ist und jeder Durchschlag die Oberfläche verändert, ist es extrem wichtig, dass jede Messung den gleichen Ablauf hat. Es wurde dabei wie folgt vorgegangen:

Begonnen wird mit der Wechsellspannungsprüfung. Der Startwert liegt bei 85 kV rms. Die Spannung wird eine Minute lang gehalten. Wenn es keinen Durchschlag gegeben hat,

wird die Spannung um 5 kV erhöht und wieder für eine Minute gehalten. Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis es zum Durchschlag kommt. Wenn es einen Durchschlag gegeben hat, wird die Spannung notiert und die Messung beginnt erneut mit einem Startwert von 85 kV. Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis keine konditionierenden Durchschläge mehr auftreten. Das Ende der Konditionierung wird als erreicht angenommen, wenn sich die Durchschlagsspannung bei zehn aufeinanderfolgenden Durchschlägen nicht mehr erhöht.

Nach der Wechselspannungsprüfung erfolgt die Messung der Spannungsfestigkeit mit Stoßspannung. Als erstes wird mit negativer Polarität konditioniert. Der Startwert liegt 50 % unter der erwarteten Spannungsfestigkeit. Der Zusammenhang zwischen der Spannungsfestigkeit bei Wechselspannung \hat{U}_{AC} und Blitzstoßspannung \hat{U}_{LI} ist in Gleichung (5.3) angegeben [Sla08].

$$\hat{U}_{LI} = 1,429 \hat{U}_{AC} \quad (5.3)$$

Dadurch ergibt sich mit dem Effektivwert der maximalen Durchschlagsspannung der Wechselspannungsprüfung eine Startspannung von:

$$\hat{U}_{LI} = 0,5 \times 1,429 \sqrt{2} U_{AC,eff} \quad (5.4)$$

Das Vorgehen ist dabei die „Up and Down“-Methode mit Spannungsschritten von 4 kV. Bei einem Durchschlag wird der Scheitelwert notiert. Ein Endkriterium wie bei der Wechselspannungsprüfung (die Prüfung wird beendet, wenn sich der Endwert innerhalb von zehn Messungen nicht erhöht) ist hier nicht praktikabel. Es hat sich gezeigt, dass zum Erreichen dieses Endkriteriums über 100 Durchschläge stattfinden müssten. Damit der Konditionierungsverlauf charakterisiert werden kann, erweist es sich als ausreichend, wenn nach 50 Durchschlägen der Konditionierungsvorgang abgebrochen wird. An dieser Stelle geht die Konditionierungskurve schon in die Sättigung. Messreihen mit über 200 Durchschlägen haben gezeigt, dass eine weitere Steigerung der Spannungsfestigkeit danach prinzipiell möglich aber für einen Vergleich von verschiedenen Konditionierungsvorgängen nicht notwendig ist. Im Anschluss folgen die Messungen mit positiver Polarität nach der gleichen Vorgehensweise.

Die in der Literatur beobachteten Oberflächenaufladungen von Keramiken durch Stoßspannungen wurde bei der Ermittlung der Durchschlagsspannung nicht berücksichtigt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Oberflächenaufladungen auch nach mehr als vier

Tagen nicht zurückgingen [deT73]. Eine Neutralisierung der Ladung nach jeder Stoßspannungsbeanspruchung ist durch den Versuchsaufbau nicht möglich. Eine im Isoliergefäß angebrachte Entladevorrichtung würde das äußere elektrische Feld des Prüfkörpers beeinflussen und zu eventuellen Außenüberschlägen führen. Eine manuelle Entladung per Hand würde zu lange dauern, da dafür das Isoliergefäß geöffnet werden und das Isolieröl abgelassen und anschließend wieder aufgefüllt werden muss. Bei den verwendeten Stoßspannungsformen würde die maximale Oberflächenaufladung bereits nach einer Spannungsbeanspruchung erreicht werden. Falls diese Oberflächenaufladung schon zu einem Durchschlag führt, müsste jede zweite Stoßspannungsbeanspruchung einen Durchschlag einleiten. Da das nicht der Fall ist, wird von der Annahme ausgegangen, dass die Oberflächenaufladung für diese Arbeit vernachlässigbar ist.

6 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse vorgestellt. Kapitel 6.1 zeigt die Ergebnisse des Konditionierungsverlaufs der Prüfkörper. Das Kapitel ist zusätzlich unterteilt in Messungen mit Wechselspannung, Messungen, bei denen der Strombegrenzungswiderstand R_{begrenz} variiert wurde, Messungen mit einer Parallelkapazität sowie den Konditionierungsverlauf von Prüfkörpern ohne Metaldampfschirm, bei denen der Durchschlag vom Tripelpunkt aus entsteht. Kapitel 6.2 behandelt den zeitlichen Verlauf der Parameter Strom, Spannung und Ladung während konditionierender und dekonditionierender Durchschläge. Der Einfluss von Fertigungsparametern auf das dielektrische Verhalten der Prüfkörper wird in Kapitel 6.3 untersucht.

6.1 Konditionierungsverlauf

In dem folgenden Kapitel soll erst auf den Konditionierungsverlauf allgemein und die Auswertung eingegangen werden. Danach werden die Ergebnisse der Wechselspannungs- und der Stoßspannungsmessung vorgestellt.

6.1.1 Allgemeiner Konditionierungsverlauf

Die Konditionierung an Prüfkörpern wurde wie in Kapitel 5.3 beschrieben mit Wechselspannung und Stoßspannung durchgeführt. Die hier vorgestellten Messergebnisse beziehen sich aber hauptsächlich auf die Ergebnisse mit Stoßspannung, da hier die Effekte der Konditionierung besser zu sehen sind. Prinzipiell sind die Effekte bei Wechsel- und Stoßspannung gleich. Bei den Prüfkörpern mit Kontaktabständen im Bereich von 15 mm steigt die Spannungsfestigkeit zum Beispiel nur um zwei Spannungsstufen mit jeweils 5 kV. Daraus ist ein Konditionierungsverlauf nicht erkennbar. Bei der Stoßspannungsprüfung sind im Mittel vierzig Spannungsstufen mit jeweils 4 kV pro Stufe enthalten. Die Anzahl der Konditionierungsdurchschläge liegt bei Wechselspannung im Bereich von zwanzig Durchschlägen, wobei die zehn letzten Durchschläge nicht mehr zur Konditionierung zählen. Diese letzten zehn Durchschläge sollen verifizieren, dass die Konditionierung abgeschlossen ist. Bei der Stoßspannungskonditionierung wurde die Messreihe nach fünfzig Durchschlägen beendet. Diese erhöhte Anzahl von Durchschlägen und der breitere Messwertebereich lassen eine detailliertere Auswertung zu.

Insgesamt wurden dielektrische Prüfungen an ca. 60 Prüfkörpern durchgeführt. Damit der Konditionierungsverlauf aller Prüfkörper vergleichbar ist, wurden die Messungen nur an fabrikneuen Prüfkörpern durchgeführt. Auf ein anschließendes Dekonditionieren der Prüfkörper für eine erneute Messung wurde verzichtet, da die Messergebnisse stark streuen und nicht garantiert werden kann, dass nach einer gezielten Dekonditionierung die Startkonditionen für jeden Prüfkörper gleich sind. Durch die begrenzte Anzahl von Prüfkörpern, die durch die starke Streuung der Messergebnisse notwendigen mehrfachen Messungen des gleichen Versuchsaufbaus und durch anfängliche Probleme (Durchschlag der Keramik, Einstellung der Messtechnik, Sicherstellen der äußeren Isolation) konnte nicht jede Konfiguration der gleichen Anzahl von Messungen unterzogen werden.

Durch die Veränderung der Konditionierungskreisparameter ergeben sich unterschiedliche Stoßspannungsformen. Der Einfluss der Spannungssteilheit wurde auch schon von König untersucht [Kön85]. Er fand heraus, dass die Überschlagspannung mit der Spannungssteilheit korreliert. Die in seiner Veröffentlichung dargestellten Ergebnisse zeigen, dass eine Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Steilheit vorhanden ist, und diese mit steigendem Kontaktabstand zunimmt. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Stoßspannungsformen verändern sich die Steilheiten von $4 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$ bis $291 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$ (siehe Tabelle 5.2). Dadurch steigert sich die Durchschlagspannung nach König um 20 kV, die Messwerte streuen aber in einem Bereich von $\pm 100 \text{ kV}$. Die Veränderung der Durchschlagspannung ist im Vergleich zur Streuung also vernachlässigbar. Da König in seiner Arbeit kleinere Spannungen und Abstände untersuchte als in dieser Arbeit, können die Ergebnisse auch nicht komplett übertragen werden. Die Art des Durchschlagmechanismus kann deshalb ein ganz anderer sein. Auch bei den verwendeten Stoßspannungsformen gab es Abweichungen. König benutzte symmetrische Dreiecksstoßspannungen, so dass er bei steilen Flanken auch nur kurze Impulse erhielt, während flache Flanken zu langen Impulsen führten. In der Veröffentlichung wird auch nicht auf die Reihenfolge der Messungen eingegangen, so dass es möglich ist, dass der Effekt durch eine unvollständige Konditionierung hervorgerufen wird und die Kontakte während der Messung weiter konditioniert werden.

Damit eine unterschiedliche Spannungsfestigkeit bei unterschiedlichen Konditionierungsstoßspannungen ausgeschlossen werden kann, wurde geklärt, ob es einen Unterschied gibt, wenn sich die Stoßspannungsformen bei der Konditionierung und bei der

Stehspannungsermittlung unterscheiden. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Stoßspannungsformen mit der Normblitzstoßspannung ($1,2/50 \mu\text{s}$) verglichen.

Die Stehspannung wurde mit 15 Stoßspannungsbeanspruchungen geprüft. Das allgemeine 15/2-Kriterium nach IEC 60060-1(2010-09), nach dem zwei Durchschläge zulässig sind, wurde hier nicht angewendet, da jeder Durchschlag einen konditionierenden oder dekonditionierenden Effekt hat und die Durchschläge somit auch nicht normalverteilt sind. Aus diesem Grund wurde die Spannung in festen Stufen von 15-mal „kein Durchschlag“ bis 15-mal „Durchschlag“ gesteigert und diese Stufen miteinander verglichen.

Bei der Untersuchung wurde nach folgendem Schema vorgegangen:

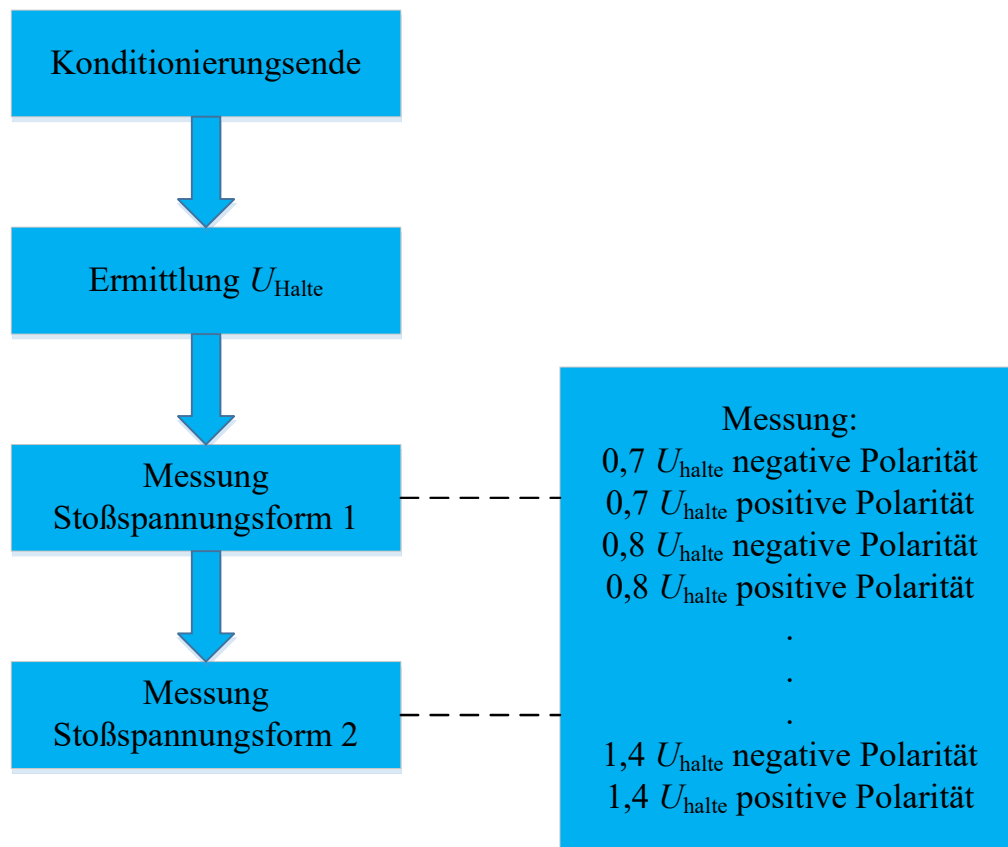


Abbildung 6-1: Schema zur Ermittlung der Stehspannungsfestigkeit mit verschiedenen Stoßspannungsformen

Bei der Ermittlung von U_{Halte} wurde folgendermaßen vorgegangen: Nach dem letzten Durchschlag des Konditionierungsvorganges wird die Spannung in 4 kV Schritten gesenkt bis es zu keinem Überslag mehr im Prüfkörper kommt. Dieser Spannungswert wird als Ausgangswert U_{Halte} definiert.

Bei $0,7 U_{\text{Halte}}$ kam es bei keinem Prüfling zu Durchschlägen (U_{D0} -Wert), die ersten Durchschläge konnten bei $0,8 U_{\text{Halte}}$ festgestellt werden. Bei $1,4 U_{\text{Halte}}$ konnte kein Prüfling mehr die angelegte Spannung halten (U_{D100} -Wert), teilweise wurde der U_{D100} -Wert schon bei $1,2 U_{\text{Halte}}$ erreicht.

Auch hier konnte eine weitere Konditionierung während der Messungen beobachtet werden, da sich die Durchschläge während der 15 Beanspruchungen nicht statistisch gleichmäßig verteilen sondern meistens konzentriert gleich zu Beginn nach der Spannungserhöhung auftraten.

Bei den Messungen wurde das Prüfprogramm mit zwei Stoßspannungsformen durchgeführt, erst Stoßspannungsform 1 und direkt danach Stoßspannungsform 2. Bei den Messungen gab es folgende Variationen:

- Messungen an Prüfkörpern, die mit unterschiedlichen Strombegrenzungswiderständen konditioniert wurden
- Stoßspannungsform 1: Konditionierungsstoßspannung
Stoßspannungsform 2: 1,2/50-Stoßspannung negativ
- Stoßspannungsform 1: 1,2/50-Stoßspannung negativ
Stoßspannungsform 2: Konditionierungsstoßspannung
- Stoßspannungsform 1: 1,2/50-Stoßspannung negativ
Stoßspannungsform 2: 1,2/50-Stoßspannung negativ
- Stoßspannungsform 1: Konditionierungsstoßspannung
Stoßspannungsform 2: Konditionierungsstoßspannung

Es hat sich herausgestellt, dass sich die dielektrische Festigkeit unabhängig von der Stoßspannungsform bei der Messung mit der jeweils zweiten Stoßspannungsform erhöht hat, auch wenn Stoßspannungsform 1 identisch mit Stoßspannungsform 2 war. Dabei ist U_{D100} um $0,1 U_{\text{Halte}}$ gestiegen oder es hat sich, wenn U_{D100} gleich geblieben ist, die Spannungsfestigkeit unter dem U_{D100} -Wert verbessert. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Stoßspannungsform.

Aus diesem Ergebnis lässt sich ableiten, dass die Spannungsfestigkeit unabhängig von der Stoßspannungsform ist, wenn die Konditionierung noch nicht abgeschlossen ist. Die genauen Messergebnisse finden sich im Anhang B.

Ähnlich wie beim Spannungs-Zeit-Flächenkriterium des Gasdurchschlags gibt es beim Vakuumdurchschlag eine Zündverzugszeit t_d zwischen dem Erreichen des Spannungsscheitels und dem tatsächlichen Beginn des Spannungszusammenbruchs. Sie ist abhängig von der Feldstärke am Emitter und deshalb bei jedem Durchschlag unterschiedlich. Bei einem Durchschlag aufgrund von Feldemissionsstrom heizt sich das Emissionszentrum auf, und da die Wärmeleitungsmechanismen zu große Zeitkonstanten haben, kann die Energie nicht schnell genug abgeführt werden. Es kommt nach einiger Zeit zu einer Explosion des Emitters, welche zum Spannungszusammenbruch führt. Hier weist die Literatur verschiedene Werte im Bereich von wenigen Nanosekunden bis hin zu über 200 μs auf. Diese Werte sind abhängig von der Stoßspannungsform und dem Kontaktabstand. Erfolgt der Durchschlag durch Mikropartikel, kann die Zündverzugszeit t_d bis zu 133 μs (siehe Tabelle 2.2) betragen. Wenn ein Durchschlag aus diesem Grund nach dem Maximum stattfindet, wird trotzdem der Maximalwert als Durchschlagspannung genommen [Gol90] [Küc09] [Sla08].

Bei der Wechsellspannungsprüfung treten die Durchschläge immer im Spannungsscheitel auf und größtenteils in der positiven Halbwelle. Die Überschlüge traten meistens in dem Zeitraum auf, in dem die Spannung für eine Minute auf konstantem Wert gehalten wurde, und nicht beim Spannungsanstieg. Eine Auswertung der Zeitspanne zwischen dem Durchschlag und dem Erreichen des Spannungsniveaus wurde nicht durchgeführt.

Während der Messung wurde aus Arbeitsschutzmaßnahmen die Röntgenstrahlung gemessen. Während die Spannung konstant gehalten wurde, konnte man ein Ansteigen der Röntgenstrahlung feststellen. Anhand dieses Verhaltens kann davon ausgegangen werden, dass der Durchschlag bei Wechsellspannung durch Feldemissionen verursacht wurde. Ein weiteres Indiz dafür ist, dass während der Wechsellspannungsprüfungen Durchschläge durch die Keramik stattfanden, die nach Slade auch einen Feldemissionsstrom als Ursache haben [Sla08].

Der Prüfablauf wurde schon in Kapitel 5.3 erläutert. Nach jeder Messung wurden die Ergebnisse als Konditionierungsverläufe dargestellt. In Abbildung 6-2 sind zwei Konditionierungsverläufe abgebildet.

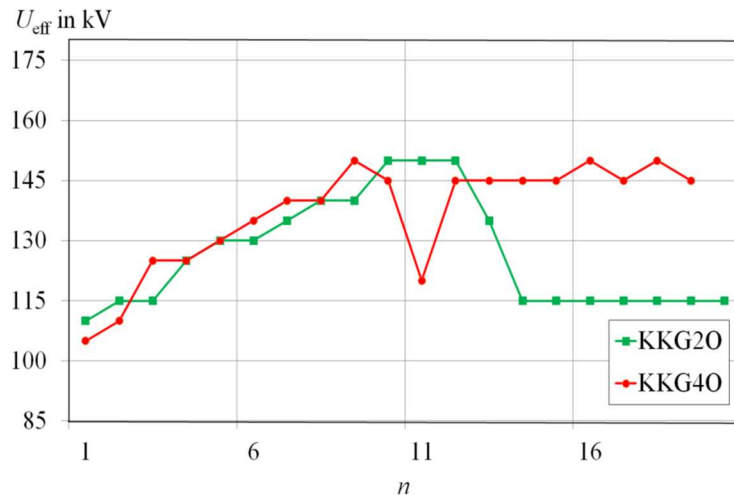


Abbildung 6-2: Konditionierungsverlauf von zwei Wechselspannungsmessungen an zwei baugleichen Prüfkörpern

Das Diagramm zeigt den chronologischen Ablauf der dielektrischen Wechselspannungsprüfung von zwei identischen Prüfkörpern. Beim Betrachten der Diagramme muss beachtet werden, dass die Ermittlung der Durchschlagsspannung mit Stoßspannung von der Ermittlung der Wechselspannungsdurchschlagspannung abweicht. Bei der Wechselspannungsprüfung wird nach einem Durchschlag mit einer kleineren Spannung begonnen, bei der es garantiert nicht zum Durchschlag kommt, und diese wird bis zum nächsten Durchschlag gesteigert. Bei Prüfungen mit Stoßspannungen werden die Stoßspannungen um ΔU reduziert. Wenn der Durchschlag die Oberfläche zu stark beschädigt hat, kann es schon bei $U_n < U_{n-1} - \Delta U$ zu einem Durchschlag kommen.

Abbildung 6-2 zeigt die Veränderung der Durchschlagspannung durch die vorherigen Durchschläge. Dabei ist jede Markierung ein Durchschlag. Der rote Verlauf gibt einen erfolgreichen Konditionierungsverlauf wieder. Bis zu Durchschlag Nr. 9 sind die Durchschläge konditionierend. Danach geht der Verlauf in die Sättigung über, die maximale Spannungsfestigkeit ist erreicht. Lediglich Durchschlag Nr. 10 war dekonditionierend. Die vorherige Spannungsfestigkeit konnte nach einem konditionierenden Durchschlag wiederhergestellt werden. Der grüne Verlauf hingegen zeigt einen dekonditionierenden

Verlauf. Nach Durchschlag Nr. 12 sinkt die Spannungsfestigkeit dauerhaft und kann mit weiteren sieben Durchschlägen nicht wieder gesteigert werden. Anhand des Diagramms lässt sich auf einen Blick erkennen, ob der Konditionierungsvorgang erfolgreich war und wie oft es zu dekonditionierenden Durchschlägen gekommen ist. Damit eine schnellere Bewertung des Konditionierungsverlaufes vorgenommen werden kann, soll diese über eine Kennzahl erfolgen.

Shioiri hat einen Ansatz für solch eine Kennzahl in Form eines Konditionierungskoeffizienten vorgeschlagen. Der Verlauf einer Konditionierungskurve ist nach Gleichung (6.1) gegeben [Shi95].

$$U_{D,n} = U_1 + U_R \left(1 - e^{-\frac{n-1}{\tau}}\right) \quad (6.1)$$

$$U_R = U_L - U_1 \quad (6.2)$$

$$\tau = \frac{n-1}{\ln\left(1 - \frac{U_D - U_1}{U_R}\right)} \quad (6.3)$$

$U_{D,n}$ ist die Durchschlagsspannung beim n-ten Durchschlag, U_1 die Höhe der Durchschlagsspannung beim ersten Durchschlag, U_L die maximale Durchschlagsspannung und τ die Konditionierungskennzahl. In Abbildung 6-3 ist neben dem Konditionierungsverlauf auch τ dargestellt

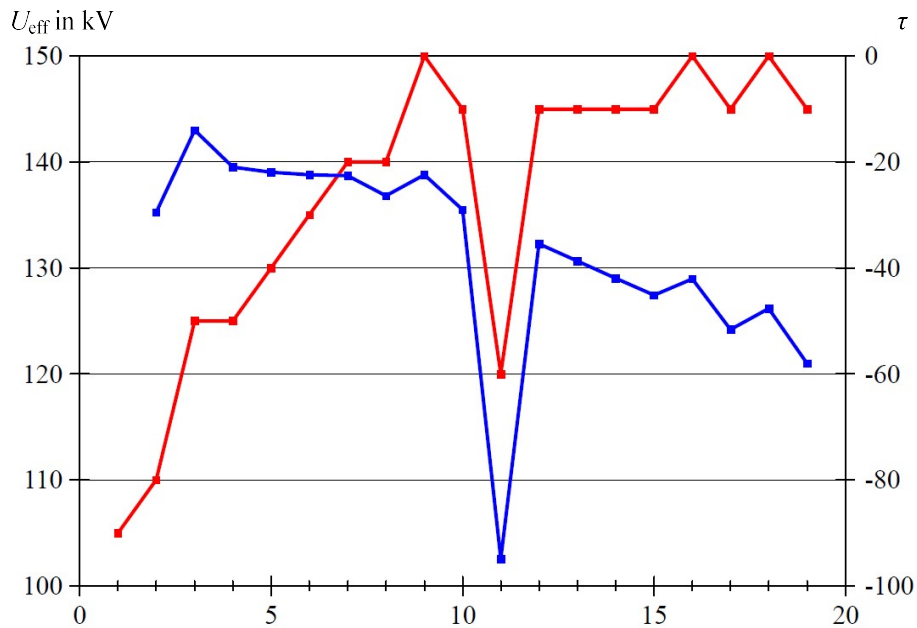


Abbildung 6-3: Konditionierungsverlauf (rot) und Konditionierungskoeffizient (blau) für den in Abb. 6.1 dargestellten Versuch mit Prüfling KKG4O

Es wird deutlich, dass τ nicht als Konditionierungskennzahl geeignet ist. Ihr Wert verändert sich während des Konditionierungsverlaufes, insbesondere dekontitionierende Durchschläge führen zu extremen Ausreißern. Des Weiteren berücksichtigt die Kennzahl nicht die Zunahme der Spannungsfestigkeit. So können die Konditionierungskoeffizienten bei zwei Konditionierungskennzahlen ähnlich sein, aber die Spannungsfestigkeitssteigerung ist unterschiedlich.

Latham hat in seiner Arbeit einen Konditionierungsfaktor nach Gleichung (6.4) benutzt, um die Konditionierung zu beschreiben.

$$\eta = \frac{E_{0n}}{E_{0v}} \quad (6.4)$$

E_{0n} ist dabei die maximale Feldstärke *nach* dem Konditionieren, bei der es zu keinem Durchschlag kommt, und E_{0v} ist die maximale Feldstärke *vor* dem Konditionieren, bei der es zu keinem Durchschlag kommt [Lat88].

Dieser Konditionierungsquotient sagt aber nichts über die Qualität der Konditionierung aus, d. h., ob es dekontitionierende Durchschläge gab, oder wie viele Durchschläge benötigt werden, bis die Konditionierung abgeschlossen ist.

Für die Bewertung eines Konditionierungsverlaufs reicht eine einzelne Kennzahl also offensichtlich nicht aus. Es werden mehrere Kennzahlen benötigt.

Eine Kennzahl muss die Information beinhalten, wie stark sich die Spannungsfestigkeit *relativ* erhöht hat. Das kann durch die relative Spannungsfestigkeitssteigerung U_R nach Gleichung (6.2) ausgedrückt werden.

Eine zweite Kennzahl muss beschreiben, wie stark sich die Spannungsfestigkeit *absolut* erhöht. Das kann anhand des absoluten Konditionierungsgrades η_A ausgedrückt werden. Er beträgt 1, wenn die maximale Spannungsfestigkeit mit dem Konditionierungsvorgang erreicht wurde, und wird nach Gleichung (6.5) berechnet.

$$\eta_A = \frac{U_L}{U_A} \quad (6.5)$$

U_A ist dabei die maximal erreichbare Durchschlagsspannung, die für eine Geometrie ermittelt wurde. Dabei muss beachtet werden, dass bei den Stoßspannungsmessungen nicht bis zur maximalen Spannungsfestigkeit konditioniert wird. Nach 50 Durchschlägen wurde die Konditionierung abgebrochen. Die zweite Kennzahl soll zeigen, wie groß der Abstand der erreichten Spannungsfestigkeit U_L zu der maximal erreichbaren Spannungsfestigkeit U_A ist. Diese ist aber unbekannt oder nur schwer zu ermitteln. Die Berechnung über die maximale Feldstärke ist theoretisch möglich. In Kapitel 2.1.1 wurde die kritische Feldstärke E_K erwähnt, die mikroskopisch erforderlich ist, um Feldemissionen zu erhalten. Diese beträgt für Kupfer 6900 kV/mm. Bei den durchgeführten Messungen war die höchste makroskopische Feldstärke, bei der es zum Durchschlag kam, 73,4 kV/mm, was zu einem β -faktor von 94 führt. Anhand von Feldsimulationen (Kapitel 7) führt das zu der simulierten, maximal erreichbaren Durchschlagsspannung $U_{A,S}$. Diese ist für die verschiedenen Prüfkörpermodelle in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Tabelle 6.1: Maximal erreichbare Durchschlagspannung U_A für die verschiedenen Prüfkörper unter der Annahme $\beta = 94$.

Prüfkörper	Keramiklänge in mm	$U_{A,S}$ in kV (simuliert)	U_A in kV (gemessen)
KKGXN	70	779,8	407,7
KKGXO	70	939,8	466,7
KKOXN	70	714,5	365,3
KKOXO	70	1000,5	457,4
KLGXN	70	394,4	312,8
KLGXO	70	394,6	394,4
KLOXN	70	392,5	276,8
KLOXO	70	396,1	331,5
KKOXO	45	594,5	299,3
KKGXO	45	545,8	-

Die durch die Simulation ermittelten Werte weichen teilweise erheblich von den gemessenen Werten ab. Die Ursachen dafür können vielfältig sein. So kann es durch die verschiedenen Kontaktabstände und Feldstärken dazu kommen, dass andere Durchschlagmechanismen wirksam sind. Außerdem kann die reale Geometrie von den CAD-Modellen abweichen oder der β -Faktor variiert bei den Prüfkörpern. Aus diesem Grund wird für jede Dampfschirmgeometrie die maximal erreichte Durchschlagspannung \hat{U}_A als Vergleichskriterium benutzt.

Prüfkörper ohne Metaldampfschirm entziehen sich einer Simulation, da bei diesen Prüfkörpern der Durchschlag von einem Tripelpunkt (Keramik-erstarrtes Lot-Vakuum) ausgeht. Da bei dem erstarrten Lot die exakte Geometrie nicht ermittelt werden kann, ist es nicht möglich, die exakte Feldstärke zu bestimmen. Auch messtechnisch bestimmte \hat{U}_A -Werte sind nicht repräsentativ. Die Ausreißer sind zu extrem, um sie in die Auswertung aufzunehmen, kommen aber zu häufig vor, um sie außer Acht zu lassen. Aus diesem Grund wird für diese Varianten kein \hat{U}_A -Wert angegeben.

Eine weitere Kennzahl soll den Einfluss der dekonditionierenden Durchschläge berücksichtigen. Die Anzahl ist dafür nicht ausreichend. Abbildung 6-4 zeigt zwei Konditionierungsverläufe bis zum Durchschlag Nr. 26.

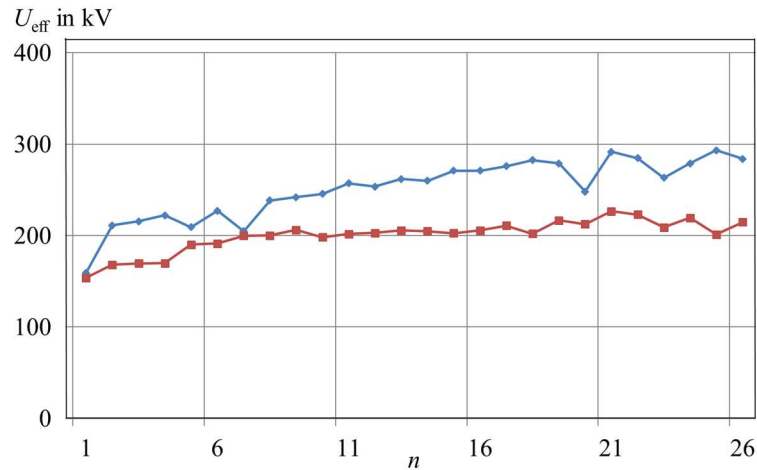


Abbildung 6-4: Beispiele für zwei Konditionierungsverläufe

Auf den ersten Blick scheint der blaue Konditionierungsverlauf besser als der rote. Die Konditionierungskennzahlen befinden sich in Tabelle 6.2. Aufgrund von U_R und η_A wäre hier klar, dass der blaue Verlauf der bessere wäre.

Abbildung 6-5 zeigt dieselben Konditionierungsverläufe bis zum Durchschlag Nr. 50. Hier ist nun ersichtlich, dass der Prüfling mit dem roten Verlauf erfolgreich konditioniert wurde. Beim anderen Prüfling (blauer Verlauf) trat eine Dekonditionierung gegen Ende des Konditionierungsvorganges auf.

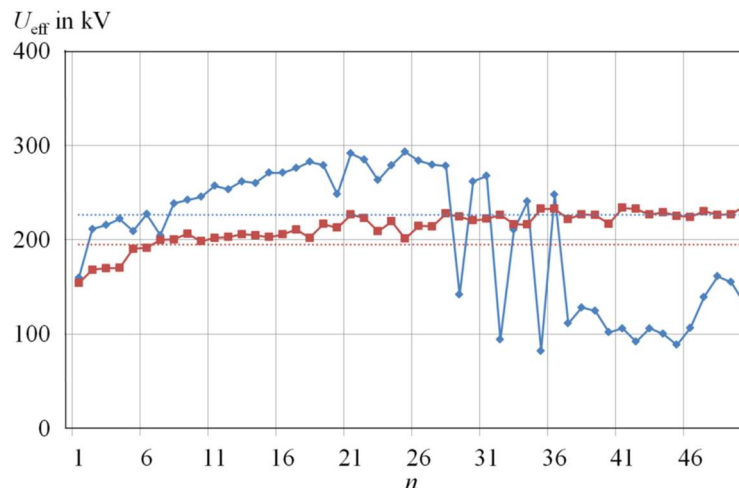


Abbildung 6-5: Beispiele für einen erfolgreichen Konditionierungsverlauf (rot) und einen nicht-erfolgreichen Konditionierungsverlauf (blau), mit eingezeichnetem Grenzwert für n_D (gepunktet) an baugleichen Prüfkörpern

Es wird also eine Kennzahl benötigt, durch die man dieses Verhalten ausdrücken kann. Bei dem blauen Konditionierungsverlauf treten 23 dekonditionierende Durchschläge auf,

bei dem roten 22. D. h. die Zahl dekonditionierender Durchschläge ist praktisch bei beiden Verläufen identisch. Damit die Dekonditionierung aber trotzdem durch eine Kennzahl ausgedrückt werden kann, wird der Dekonditionierungsgrad η_D nach Gleichung (6.6) eingeführt.

$$\eta_D = \frac{n_D}{n} \quad (6.6)$$

Er ist das Verhältnis aller Durchschläge, für die Gleichung (6.7) gilt, geteilt durch die Gesamtanzahl aller Durchschläge.

$$U_D < \frac{U_R}{2} + U_1 \quad (6.7)$$

Dieser Grenzwert ist nochmal grafisch in Abbildung 6-5 für beide Konditionierungsverläufe dargestellt. Es ist erkennbar, dass beim erfolgreichen Konditionierungsverlauf (rot) nur die ersten Durchschläge unter dem Grenzwert liegen, während beim nicht erfolgreichen Konditionierungsverlauf (blau) die Werte nach einigen Durchschlägen wieder unter den Grenzwert fallen und dort bleiben.

Je höher η_D ist, desto höher ist die Anzahl der stark dekonditionierenden Durchschläge und desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Spannungsfestigkeit der Elektrodenanordnung nach dem Konditionieren im Bereich von U_L liegt.

Die Konditionierungskennzahlen für die Konditionierungsverläufe aus Abbildung 6-5. können Tabelle 6.2 entnommen werden.

Tabelle 6.2: Konditionierungskennzahlen für die Konditionierungsverläufe aus Abbildung 6-5

Konditionierungskennzahl	Blauer Verlauf	Roter Verlauf
U_1	159,5 kV	154 kV
U_L	293,3 kV	236 kV
U_A	312,8 kV	312,8 kV
Grenzwert für n_D	226,4 kV	195 kV
U_R	133,8 kV	82 kV
η_A	0,938	0,754
η_D	0,48	0,12
Anzahl dekonditionierende Durchschläge	23	22

Anhand der Kennwerte lässt sich erkennen, dass der blaue Konditionierungsvorgang eine höhere Spannungsfestigkeitssteigerung hat und auch näher an der maximal erreichbaren

Spannungsfestigkeit ist, aber dafür eine größere Anzahl von dekonditionierenden Durchschlägen hat und zum Schluss das schlechtere Ergebnis zeigt.

Bei der Bewertung des Konditionierungsverlaufes gibt es zwei Aspekte die betrachtet werden können. Zum einen die Steigerung der Spannung zum anderen die Kontinuität der Messergebnisse. Bei bestimmten Anwendungen kann es von Vorteil sein, dass die Durchschlagsspannung schnell einen höheren Wert annimmt, dafür aber eine größere Streuung akzeptiert wird. In den meisten Fällen kann man aber davon ausgehen, dass eine geringere Spannungssteigerung, mit einer geringeren Streuung, das gewünschte Konditionierungsverhalten ist. Aus diesem Grund ist der rote Verlauf auch der „bessere“ Konditionierungsverlauf, obwohl U_L und η_A geringer sind als beim blauen Verlauf.

Ein optimaler Konditionierungsverlauf zeichnet sich durch eine hohe Spannungsfestigkeitssteigerung U_R und einen hohen absoluten Konditionierungsgrad η_A bei einem geringen Dekonditionierungsgrad η_D aus. Durch ein hohes U_R und η_A zeigt sich, dass die Spannungsfestigkeit während des Konditionierens stark angestiegen ist und sich in der Nähe der maximal möglichen Spannungsfestigkeit befindet. Der niedrige η_A -Wert zeigt, dass es keine bzw. nur wenige dekonditionierende Durchschläge gab, so dass man dem erreichten Wert für die Spannungsfestigkeit auch trauen kann und nicht fürchten muss, dass der nächste Durchschlag bei einer sehr viel geringeren Spannung stattfindet.

6.1.2 Vorkonditionierung mit Wechselspannung

Wie bereits erwähnt, liegt der Fokus dieser Arbeit auf Messungen mit Stoßspannungen, da man hier den Konditionierungsvorgang besser beobachten kann. Trotzdem wurde vor der Stoßspannungsmessung eine Wechselspannungsmessung durchgeführt. Dadurch wird die dielektrische Vorgeschichte vor der eigentlichen Konditionierung mit Stoßspannung ersichtlich da, die Durchschläge bei einer höheren Spannung stattfinden als bei der „Vorkonditionierung“ im Werk.

In Abbildung 6-6 sind Konditionierungsverläufe der Wechselspannungsprüfung für die Dampfschirmgeometrie KKOXN dargestellt.

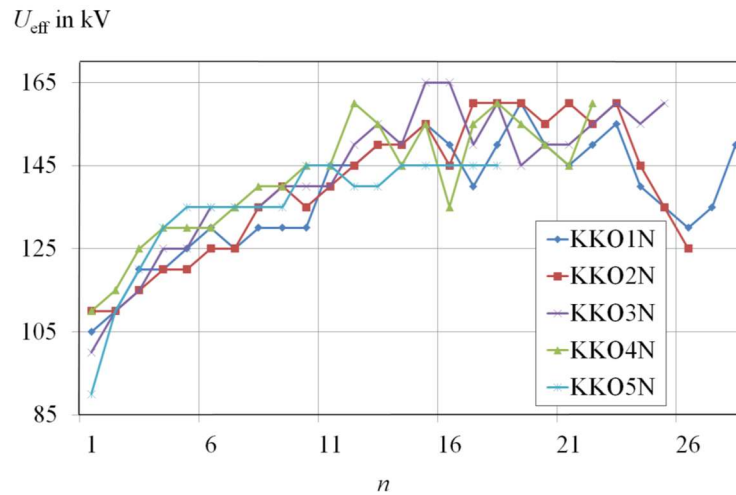


Abbildung 6-6: Konditionierungsverläufe für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKOXN mit 70-mm-Keramik

Die entsprechenden Konditionierungskennzahlen der einzelnen Prüfkörper und die Mittelwerte für die genannte Geometrie sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Tabelle 6.3: Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKOXN mit 70-mm-Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKO1N	55	0,44	0,39
KKO2N	50	0,44	0,31
KKO3N	65	0,45	0,2
KKO4N	50	0,44	0,27
KKO5N	55	0,4	0,11
Mittelwert	55	0,43	0,26
Standardabweichung	6,12	0,02	0,1

Hier lässt sich sehr gut erkennen, dass die Konditionierungsverläufe ähnlich sind. Das spiegelt sich auch in den Kennzahlen U_R und η_A wider. Anhand von η_D wird deutlich, dass bei den Prüfkörpern KKO1N und KKO2N eine stärkere Dekonditionierung stattgefunden hat.

Im Gegensatz dazu stehen die Konditionierungsverläufe in Abbildung 6-7 und die dazugehörigen Kennwerte in Tabelle 6.4.

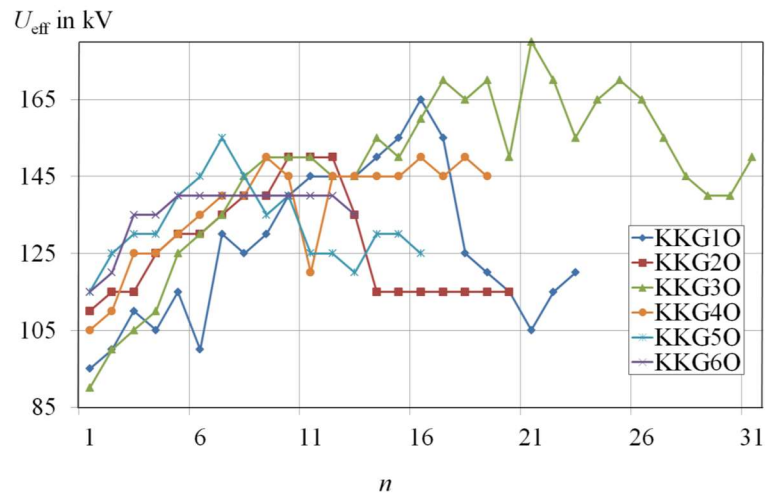


Abbildung 6-7: Konditionierungsverläufe für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKGXO mit 70-mm-Keramik

Tabelle 6.4: Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKGXO mit 70-mm-Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG10	70	0,36	0,57
KKG20	40	0,32	0,55
KKG30	90	0,39	0,19
KKG40	45	0,32	0,26
KKG50	40	0,33	0,63
KKG60	25	0,3	0,15
Mittelwert	51,6	0,34	0,39
Standardabweichung	23,8	0,03	0,21

Es lässt sich eine große Abweichung der Verläufe innerhalb der gleichen Dampfschirmgeometrie erkennen. Extrembeispiele sind die Prüfkörper KKG30 und KKG60. Hier unterscheidet sich die Spannungsfestigkeitssteigerung um den Faktor 3,6. Prüfkörper KKG30 lässt sich auf eine viel höhere Spannungsfestigkeit konditionieren. Durch die auftretenden dekonditionierenden Durchschläge lässt sich aber nicht sagen, wie hoch die tatsächliche Spannungsfestigkeit am Ende ist. Nach dem letzten Durchschlag könnte der nächste bei ca. 160 kV oder aber auch bei 140 kV liegen. Prüfkörper KKG60 hingegen konnte nicht so hoch konditioniert werden, vermutlich liegt die Durchschlagsspannung bei 140 kV. Dieses Beispiel zeigt, dass nicht generell von dem Mittelwert einer Dampfschirmgeometrie auf die einzelnen Prüfkörper geschlossen werden kann, da die Streuung sehr groß ist. Die einzelnen Konditionierungsverläufe sowie die dazugehörigen Tabellen mit den Kennzahlen finden sich im Anhang C.

Tabelle 6.5 zeigt die Mittelwerte der Konditionierungskennzahlen aller untersuchten Dampfschirmgeometrien.

Tabelle 6.5: Mittelwerte der Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung

Prüfkörper	Keramiklänge in mm	\bar{U}_R in kV	s_e in kV	$\bar{\eta}_A$	s_e von η_A	$\bar{\eta}_D$	s_e von η_D
KKGXN	70	53,75	4,79	0,4	0,01	0,32	0,06
KKGXO	70	51,67	23,8	0,34	0,03	0,39	0,21
KKOXN	70	55	6,12	0,43	0,02	0,26	0,1
KKOXO	70	63	10,3	0,37	0,02	0,33	0,09
KLGXN	70	12,11	8,05	0,32	0,02	0,45	0,17
KLGXO	70	10	7,75	0,26	0,03	0,52	0,21
KLOXN	70	10,77	6,07	0,36	0,02	0,32	0,17
KLOXO	70	10	0	0,29	0	0,37	0,11
KKOXO	45	32	6,71	0,42	0,02	0,35	0,17

Die Messwerte zeigen, dass die Spannungsfestigkeitssteigerung bei den Prüfkörpern mit größerem Kontaktabstand höher ist als bei Prüfkörpern mit kleinem Kontaktabstand. Ansonsten lassen sich keine Aussagen aus den Kennzahlen herleiten, die besagen, dass eine bestimmte Geometrie ein besseres Konditionierungsverhalten hat als eine andere. Da der Durchschlag immer einige Zeit nachdem die Spannung gesteigert wurde stattgefunden hat und nicht beim Erhöhen der Spannung, deutet diese Tatsache auf einen Durchschlag aufgrund von fließenden Feldemissionsströmen hin. Ein weiteres Anzeichen dafür ist die steigende Bremsstrahlung, die vor einem Durchschlag gemessen werden konnte. Die Bremsstrahlung entsteht, wenn der Impuls eines geladenen Teilchens geändert wird. In dem hier vorliegenden Fall entsteht die Bremsstrahlung, wenn aufgrund des Feldemissionsstroms die Elektronen auf der Anode auftreffen und dort negativ beschleunigt werden ($v = 0$ m/s). Die entstehende Bremsstrahlung wurde dann mit einem C5Cplus Dosimeter gemessen.

6.1.3 Konditionierungsverlauf unter Stoßspannung mit unterschiedlichen Strombegrenzungswiderständen

Bei den Untersuchungen mit Stoßspannung hat sich gezeigt, dass die Schlagweite der einzige Geometrieparameter ist, der einen messbaren Einfluss auf den Konditionierungsverlauf hat. Die Streuung der Messergebnisse ist so groß, dass der Einfluss der geometrischen Parameter wie Kröpfung und Zentriernoppen nicht messbar ist. Aus diesem Grund

werden diese Parameter nicht mehr explizit betrachtet. Die Messergebnisse werden bei gleicher Keramiklänge nur noch in „große Schlagweite“ ($39 \text{ mm} < s < 43 \text{ mm}$) und „kleine Schlagweite“ ($14,2 \text{ mm} < s < 17,8 \text{ mm}$) unterteilt.

Bei der Ermittlung des Konditionierungsverlaufes mit einer Normblitzstoßspannung, mit einer Stirnzeit von $1,2 \mu\text{s}$ und einer Rückenhalbwertszeit von $50 \mu\text{s}$ nach IEC 60060-1 (2010-09), wurde ein Strombegrenzungswiderstand $R_{\text{begrenz}} = 860 \Omega$ verwendet. Die Verläufe für positive Polarität können Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 entnommen werden, die für negative Polarität Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11.

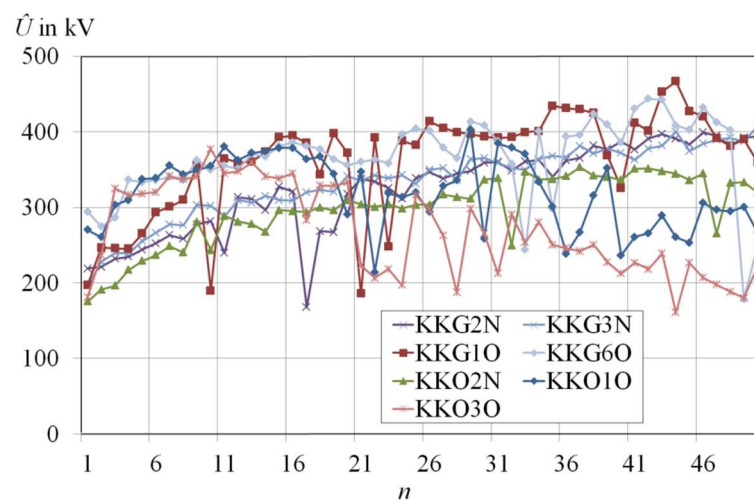


Abbildung 6-8: Konditionierungsverläufe mit positiver Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \Omega$) bei großer Schlagweite mit 70-mm-Keramik

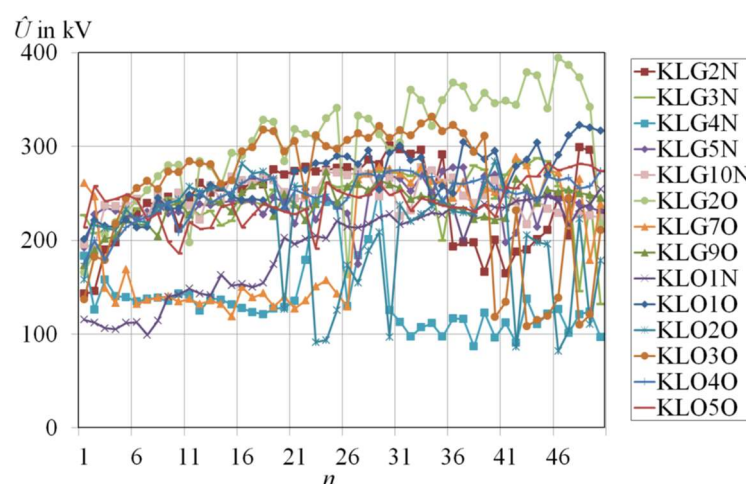


Abbildung 6-9: Konditionierungsverläufe mit positiver Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

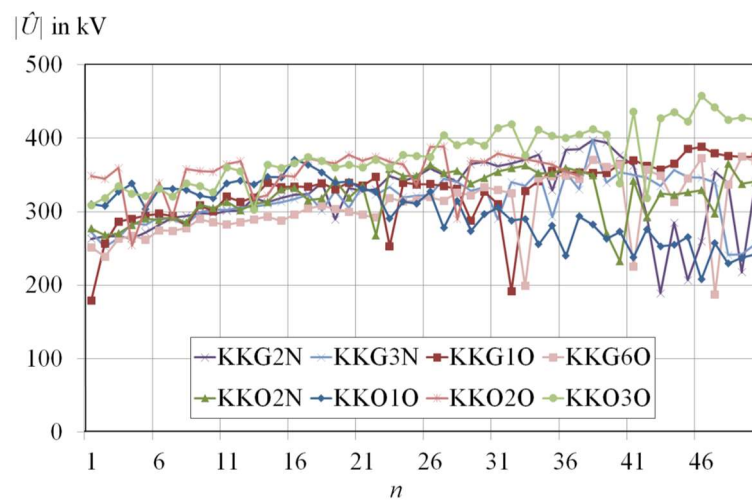


Abbildung 6-10: Konditionierungsverläufe mit negativer Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \, \Omega$) bei großer Schlagweite mit 70-mm-Keramik

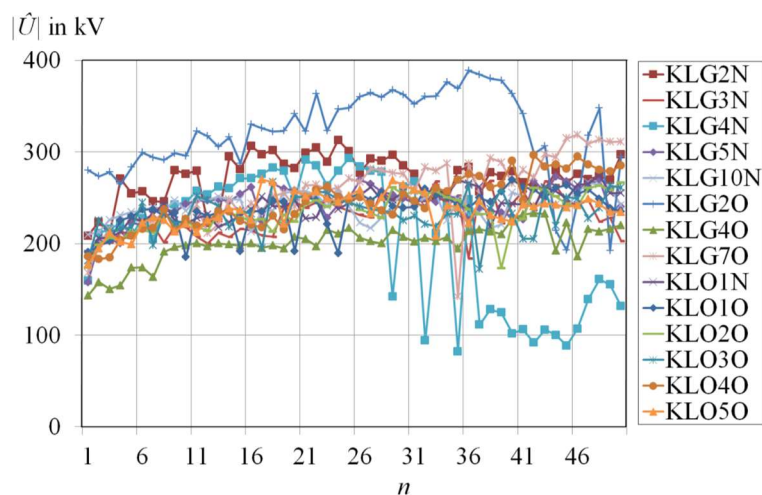


Abbildung 6-11: Konditionierungsverläufe mit negativer Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \, \Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

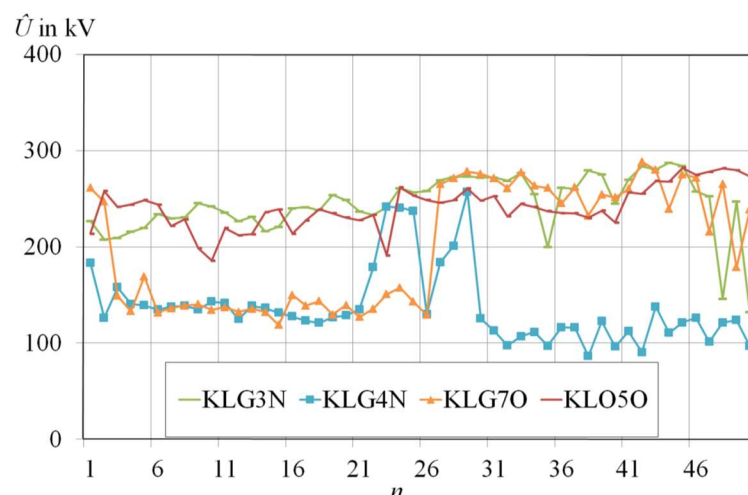
Die Konditionierungsverläufe zeigen eine sehr große Streuung, die eine weitere Verwendung der Ergebnisse unmöglich macht. Die erreichten Durchschlagspannungen bewegen sich in einem Bereich von 160 kV bis 460 kV bei großen Schlagweiten und von 82 kV bis 380 kV bei kleinen Schlagweiten. Tabelle 6.6 zeigt die Mittelwerte der Konditionierungskennzahlen für die Dampfschirmgeometrien. Die Kennzahlen der einzelnen Prüfkörper befinden sich im Anhang.

Tabelle 6.6: Mittelwerte der Konditionierungskennzahlen bei Normblitzstoß ($R_{\text{begrenz}} = 860 \, \Omega$) für verschiedenen Schlagweiten und Polaritäten

	Polarität	U_R in kV		η_A		η_D	
		\bar{U}_R in kV	σ in kV	$\bar{\eta}_A$	σ	$\bar{\eta}_D$	σ
Schlagweite: groß T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Positiv	188,19	44,72	0,94	0,07	0,36	0,17
Schlagweite: klein T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Positiv	111,79	54,58	0,88	0,09	0,45	0,23
Schlagweite: groß T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Negativ	133,56	51,19	0,91	0,09	0,5	0,25
Schlagweite: klein T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Negativ	99,5	23,61	0,86	0,11	0,32	0,14

Die Kennzahlen zeigen, dass die Streuung sehr groß ist. Sie liegt für den Dekonditionierungsgrad η_D bei den einzelnen Prüfkörpern im Bereich von 40 – 50 %.

Bei der Spannungsfestigkeitssteigerung U_R mit kleiner Schlagweite und positiver Polarität ist die Streuung im Vergleich zum Mittelwert sehr groß. Beim Betrachten der Kennzahlen der einzelnen Prüfkörper zeigt sich, dass kleine Werte von U_R mit einem großen η_D -Wert korrelieren. Abbildung 6-12 zeigt den Konditionierungsverlauf der Prüfkörper, auf die das zutrifft.

Abbildung 6-12: Ausgewählte Konditionierungsverläufe mit negativer Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \, \Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

Beim Betrachten der Konditionierungsverläufe dieser Prüfkörper wird deutlich, dass eigentlich keine Konditionierung stattfindet. Der Konditionierungsverlauf von KLG3N und KLO5O bleibt auf einem konstanten Niveau. Die Prüfkörper KLG4N und KLG7O haben am Anfang dekonditionierende Durchschläge. Während sich die Spannungsfestigkeit von KLG7O wieder auf das Niveau der Prüfkörper KLG3N und KLO5O steigert, lässt sich die Spannungsfestigkeit von Prüfkörper KLG4N nicht mehr steigern. Im Gegensatz dazu sieht der Konditionierungsverlauf der anderen Variationen (Schlagweite und Polarität) unterschiedlich aus. Hier ist eine Konditionierung erkennbar, die aber immer wieder durch dekonditionierende Durchschläge unterbrochen wird.

Das Konditionierungsverhalten bei Prüfkörper KLG4N lässt sich schon bei der davor stattfindenden Konditionierung mit negativer Polarität erkennen. Prüfkörper KLG2O hat einen annähernd gleichen Konditionierungsverlauf, bei der darauffolgenden Konditionierung mit positiver Polarität verhält er sich jedoch völlig gegensätzlich.

Beim Betrachten des absoluten Konditionierungsgrades η_A zeigt sich, dass in dieser Prüfkreisconfiguration die höchsten Spannungsfestigkeitswerte erreicht werden. Eine Korrelation zwischen hohem η_A und hohem η_D ist aber nicht gegeben. Durchschläge bei höheren Spannungen führen nicht zu einer stärkeren Dekonditionierung. Es zeigt sich viel mehr, dass bei einer gleichmäßigen Konditionierung keine allzu starken dekonditionierenden Durchschläge stattfinden. Die Konditionierungsverläufe zeigen aber auch, dass dauerhaft dekonditionierende Durchschläge auftreten können (Abbildung 6-12, KLG4N).

Bei einer Konditionierung mit einem höheren Strombegrenzungswiderstand ergibt sich ein anderes Bild. Abbildungen 6-11 bis 6-14 zeigen die Konditionierungsverläufe mit einem Widerstand $R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$. Daraus ergibt sich für die Stoßspannungsform eine Stirnzeit von $T_1 = 16 \text{ }\mu\text{s}$ und einer Rückenhalbwertszeit von $T_2 = 80 \text{ }\mu\text{s}$.

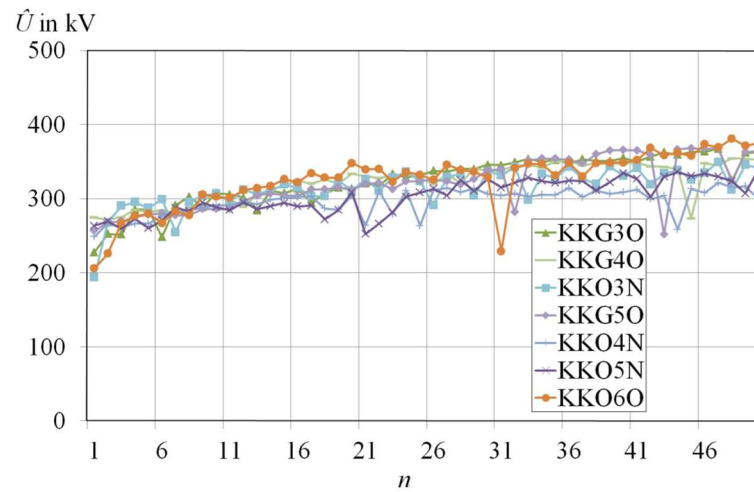


Abbildung 6-13: Konditionierungsverläufe mit positiver 16/80-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei großer Schlagweite mit 70-mm-Keramik

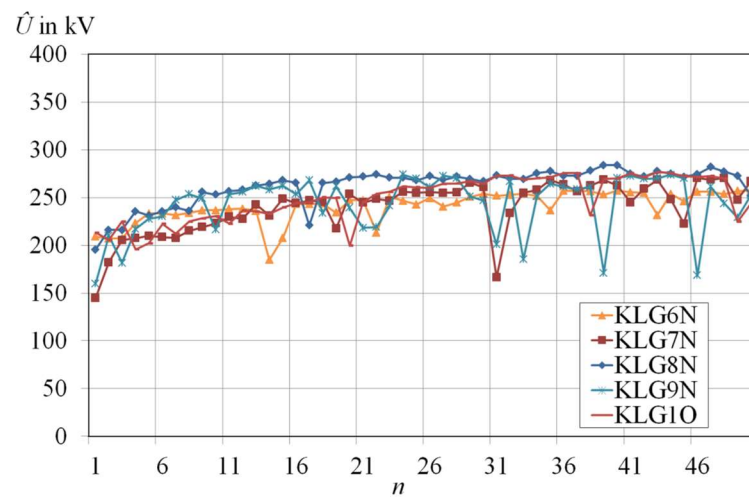


Abbildung 6-14: Konditionierungsverläufe mit positiver 16/80-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

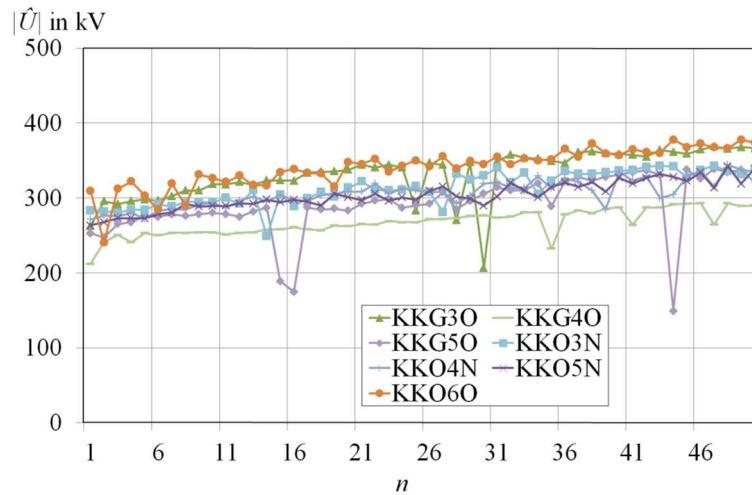


Abbildung 6-15: Konditionierungsverläufe mit negativer 16/80-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei großer Schlagweite mit 70-mm-Keramik

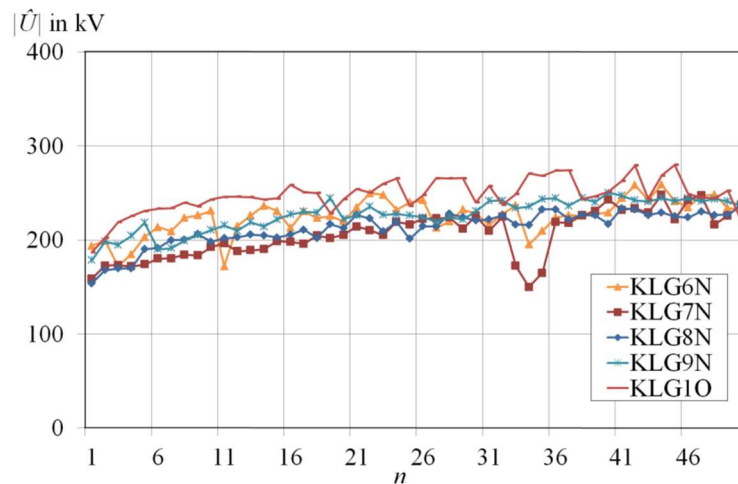


Abbildung 6-16: Konditionierungsverläufe mit negativer 16/80-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

Schon auf den ersten Blick zeigt sich, dass der Konditionierungsverlauf viel gleichmäßiger ist. Die Verläufe liegen näher zusammen, und dekonditionierende Durchschläge treten nur vereinzelt auf. Eine dauerhafte Dekonditionierung wie bei den Konditionierungsverläufen mit Normblitzstoßspannung ist nicht vorhanden. Auch das Verhalten der Spannungsfestigkeit nach einem Durchschlag ist nun anders. Während bei einer Normblitzstoßspannung die Durchschlagsspannung nach einem dekonditionierenden Durchschlag um 45 – 55 % sinkt, verringert sie sich bei einem 16/80-Stoßspannungsimpuls nur um 35 - 40 %. Tabelle 6.7 zeigt die entsprechenden Kennzahlen zu den Konditionierungsverläufen.

Tabelle 6.7: Mittelwerte der Konditionierungskennzahlen bei 16/80-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) für verschiedenen Schlagweiten und Polaritäten

	Polarität	U_R in kV		η_A		η_D	
		\bar{U}_R in kV	σ in kV	$\bar{\eta}_A$	σ	$\bar{\eta}_D$	σ
Schlagweite: groß T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Positiv	104,93	39,51	0,85	0,07	0,31	0,11
Schlagweite: klein T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Positiv	87,94	32,8	0,83	0,08	0,21	0,11
Schlagweite: groß T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Negativ	78,97	14,8	0,83	0,12	0,42	0,16
Schlagweite: klein T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Negativ	80,16	11,59	0,81	0,05	0,27	0,16

Anhand der Kennzahlen ist ersichtlich, dass der Konditionierungsvorgang gleichmäßiger verläuft. Der Dekonditionierungsgrad ist im Mittel um 24 % gesunken. Beim absoluten Konditionierungsgrad und beim Dekonditionierungsgrad zeigt sich auch das unterschiedliche Verhalten zwischen kleinen und großen Schlagweiten. Bei kleinen Schlagweiten sind η_A um 6 % und η_D um 20 % gesunken, bei großen Schlagweiten um 10 % und 43 %. U_R hat sich bei großen Schlagweiten um 42 % und bei kleinen Schlagweiten um 20 % verringert. Auch die Streuung der Werte hat sich verändert. Bei U_R ging die Streuung um bis zu 71 % und bei η_D bis zu 52 % zurück. Da die Streuung bei η_A auch schon bei Normblitzstoßspannungen sehr klein war, ist hier keine große Veränderung feststellbar. Bei der Streuung kann keine generelle Abhängigkeit von der Schlagweite festgestellt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch einen höheren Strombegrenzungswiderstand die Anzahl der stark dekonditionierenden Durchschläge verringert wird. Dadurch werden zwar nicht die maximalen Durchschlagsspannungen erreicht, aber durch die geringere Streuung sind diese Werte überhaupt erst zu einer Weiterverarbeitung geeignet.

Um zu überprüfen, ob eine weitere Vergrößerung von R_{begrenz} zur einer weiteren Vergleichmäßigung der Konditionierungsverläufe führt, wurden weitere Prüfkörper mit einem Widerstand $R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$ konditioniert. Daraus ergibt sich für die Stoßspannungsform eine Stirnzeit von $T_1 = 30 \mu\text{s}$ und einer Rückenhalbwertszeit von $T_2 = 115 \mu\text{s}$. Die Konditionierungsverläufe finden sich in Abbildungen 6-15 bis 6-18.

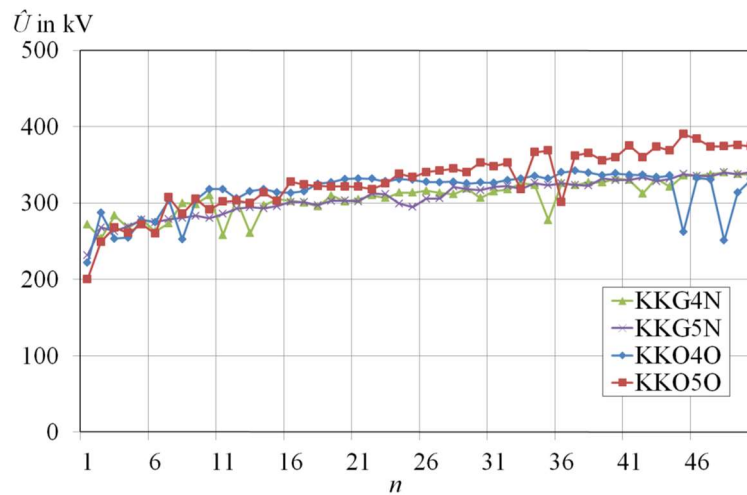


Abbildung 6-17: Konditionierungsverläufe mit positiver 30/115-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) bei großer Schlagweite mit 70-mm-Keramik

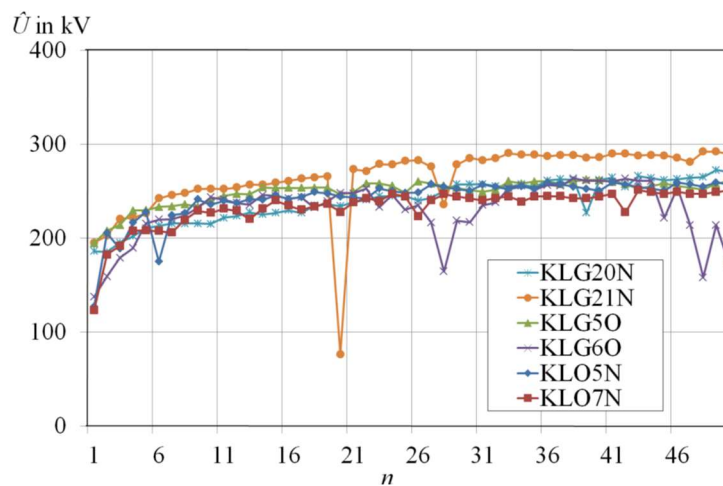


Abbildung 6-18: Konditionierungsverläufe mit positiver 30/115-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

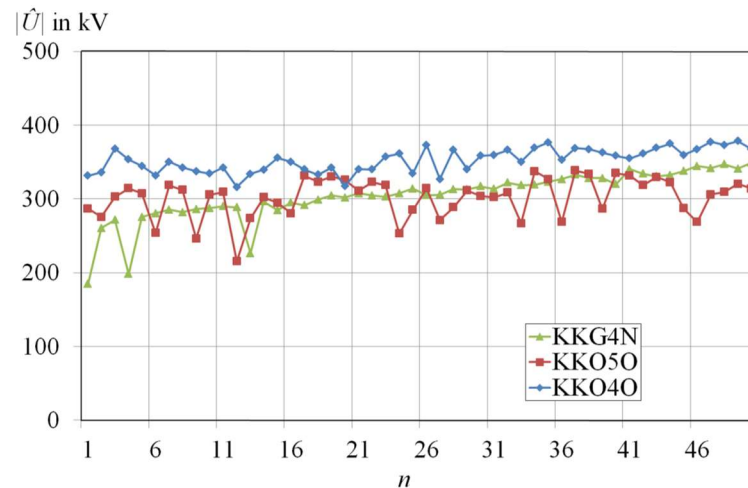


Abbildung 6-19: Konditionierungsverläufe mit negativer 30/115-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) bei großer Schlagweite mit 70-mm-Keramik

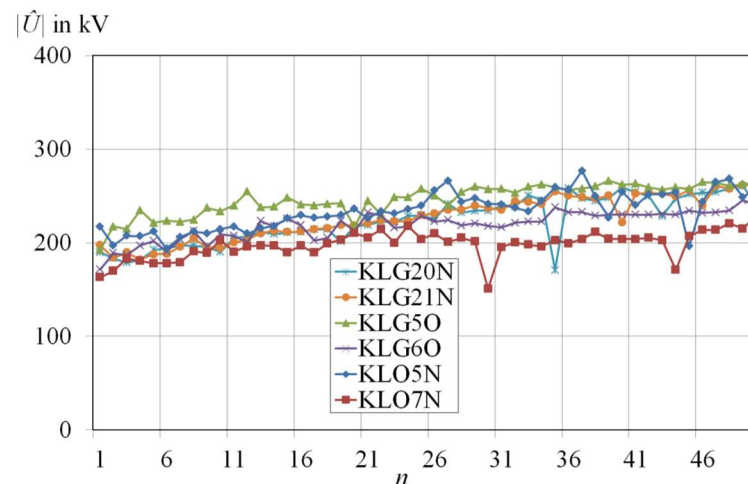


Abbildung 6-20: Konditionierungsverläufe mit negativer 30/115-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

Der Prüfkörper KKG5N hatte während der Konditionierung mit negativer Polarität einen Außenüberschlag. Danach sind Messungen an diesem Prüfkörper nicht mehr möglich, da die Isolierfähigkeit sehr stark verringert ist. Aus diesem Grund wurde die Messreihe nicht in die Auswertung mit einbezogen. Beim Betrachten der Konditionierungsverläufe sind auf den ersten Blick keine großen Unterschiede zu dem Konditionierungsverlauf mit der 16/80-Stoßspannung erkennbar. Tabelle 6.8 zeigt die dazugehörigen Konditionierungskennzahlen.

Tabelle 6.8: Mittelwerte der Konditionierungskennzahlen bei 30/115-Stoßspannungen ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) für verschiedenen Schlagweiten und Polaritäten

	Polarität	U_R in kV		η_A		η_D	
		\bar{U}_R in kV	σ in kV	$\bar{\eta}_A$	σ	$\bar{\eta}_D$	σ
Schlagweite: groß T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Positiv	121,93	50,56	0,82	0,05	0,24	0,11
Schlagweite: klein T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Positiv	106,34	26,7	0,83	0,13	0,13	0,11
Schlagweite: groß T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Negativ	87,9	66,5	0,8	0,06	0,4	0,28
Schlagweite: klein T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Negativ	68,05	5,67	0,8	0,13	0,4	0,2

Es fällt jedoch auf, dass U_R im Vergleich zu den Werten der Konditionierung mit 16/80-Stoßspannungen nicht weiter gesunken, sondern gestiegen ist. Die Steigerung liegt im Bereich von 10 – 20 %, abhängig von Schlagweite und Polarität. Eine Ausnahme davon bildet die kleine Schlagweite bei negativer Polarität. Hier sinkt U_R auch um 15 %. Der absolute Konditionierungsgrad verringert sich um 4 % bei großen Schlagweiten im Vergleich zur 16/80-Stoßspannungskonditionierung und um 1 % bei kleinen Schlagweiten. Der Dekonditionierungsgrad verringert sich um 5 – 38 %. Auch hier bildet die kleine Schlagweite bei negativer Polarität eine Ausnahme. In diesem Fall steigt der Dekonditionierungsgrad um 48 %. Die Streuung nimmt bei U_R für kleine Schlagweiten ab und für große zu. Beim absoluten Konditionierungsgrad ist es umgekehrt. Hier steigt die Streuung bei kleinen Schlagweiten, fällt aber bei großen. Beim Dekonditionierungsgrad bleibt die Streuung gleich oder steigt.

Die Untersuchungen zeigen, dass durch einen niedrigen Strombegrenzungswiderstand die Prüfkörper hin zu hohen Spannungsfestigkeiten konditioniert werden können, was durch eine hohes η_A ausgedrückt wird. Die Streuung der Ergebnisse ist aber so groß, dass die Messwerte nicht weiter verwendet werden können, da es nicht ersichtlich ist, wie sich der Prüfkörper dielektrisch nach einem Durchschlag verhält. Bei einem größeren Strombegrenzungswiderstand nimmt die Streuung ab und nach einem Durchschlag ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass vorhergesagt werden kann, in welchem Spannungsbereich der

nächste Durchschlag stattfindet. Eine weitere Erhöhung des Strombegrenzungswiderstands führt zu keiner merklichen Verbesserung der Konditionierung. Der Dekonditionierungsgrad ist insgesamt geringer. Die Veränderungen liegen nur in einem sehr kleinen Bereich mit einer hohen Streuung. Aus diesem Grund kann die Tendenz zufällig sein. Dasselbe gilt für den Anstieg von U_R . Die Reduzierung des absoluten Konditionierungsgrads ist dafür eindeutig, aber gering. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass es nicht sinnvoll ist, den Strombegrenzungswiderstand weiter zu erhöhen, da mit einem Wert von $R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$ bereits Ergebnisse erreicht werden, welche zur Weiterarbeit verwendbar sind. Ein Optimum ist dieser Wert aber nicht. Es könnte auch zwischen $18,3 \text{ k}\Omega$ und $50 \text{ k}\Omega$ liegen.

6.1.4 Konditionierungsverlauf unter Stoßspannung mit einer zusätzlichen Parallelkapazität

Bei Versuchsaufbauten sind durch Spannungsteiler, Anschlusskabel oder auch durch den Aufbau selbst immer Parallelkapazitäten zum eigentlichen Prüfobjekt vorhanden. Danikas, Schümann und Lanjun haben in ihren Arbeiten untersucht, ob und wie sich diese auf das Konditionierungsverhalten auswirken und sind dabei zu teils widersprüchlichen Ergebnissen gekommen [Dan96] [Lan99] [Sch04], um zu untersuchen wie sich Parallelkapazitäten auf diese Messungen auswirken, wurde eine Kapazität von $1,13 \text{ nF}$ parallel zum Prüfkörper aufgebaut. Dadurch, dass die Kapazität ein Vielfaches der Spannungsteilerkapazität ist, konnte sichergestellt werden, dass das Vorhandensein dieser Kapazität der dominierende Effekt in der Messreihe ist. Durch den Einsatz eines Strombegrenzungswiderstands $R_{\text{begrenz}} = 18,6 \text{ k}\Omega$ soll sichergestellt werden, dass der Konditionierungsverlauf wenig streut. Diese Kreisparameter führen zu einer Stoßspannungsform mit einer Stirnzeit von $34 \text{ }\mu\text{s}$ und einer Rückenhalbwertszeit von $125 \text{ }\mu\text{s}$. Mit dieser Stoßspannungsform liegen die Zeiten dadurch in derselben Größenordnung wie bei der 30/115-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$). Die Konditionierungsverläufe sind in Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 dargestellt.

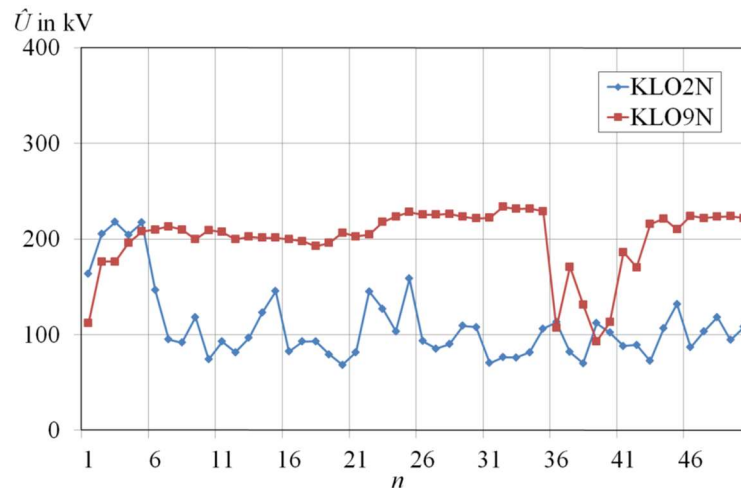


Abbildung 6-21: Konditionierungsverläufe mit positiver 34/125-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$, $C_P = 1,13 \text{ nF}$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

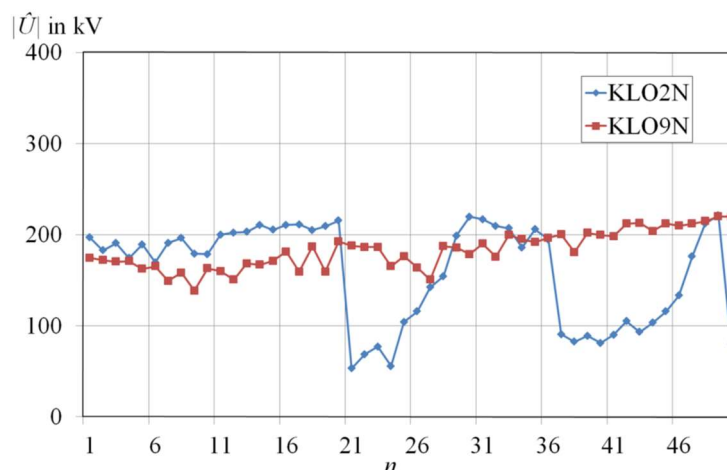


Abbildung 6-22: Konditionierungsverläufe mit negativer 34/125-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$, $C_P = 1,13 \text{ nF}$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

Es zeigt sich, dass mit diesen Prüfkreisparametern stark dekkonditionierende Durchschläge auftreten, die sonst typisch für den Konditionierungsverlauf mit Normblitzstoßspannung sind. Bei dem Prüfkörper KLO2N mit positiver Polarität ist der dekkonditionierende Durchschlag so stark, dass die anfängliche Spannungsfestigkeit nicht wieder hergestellt werden kann. Auch die erreichte Spannungsfestigkeit nach dem Konditionieren liegt unter den Werten der Messreihe ohne Parallelkapazität. Zur weiteren Validierung dieser Messergebnisse wurden die Messung mit einem erhöhtem Strombegrenzungswiderstand $R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$ durchgeführt. Die Konditionierungsverläufe mit den sich ergebenden 56/204-Stoßspannungen sind in Abbildungen 6-21 und 6-22 dargestellt.

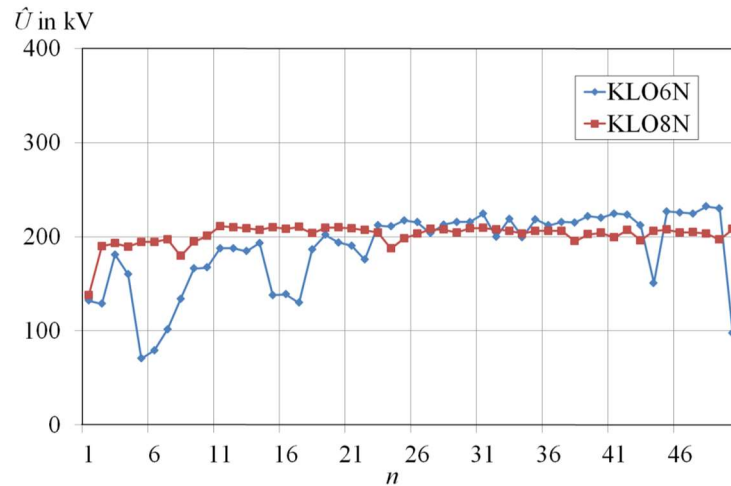


Abbildung 6-23: Konditionierungsverläufe mit positiver 56 /204-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$, $C_P=1,13 \text{ nF}$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

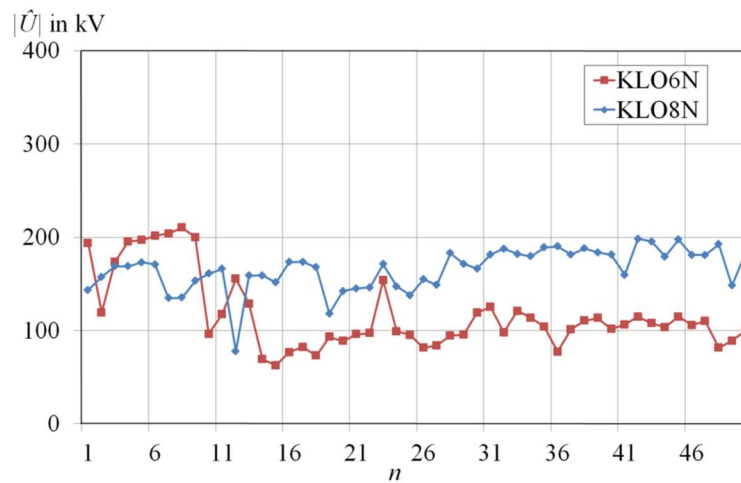


Abbildung 6-24: Konditionierungsverläufe mit negativer 56/204-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$, $C_P=1,13 \text{ nF}$) bei kleiner Schlagweite mit 70-mm-Keramik

Die Konditionierungsverläufe verhalten sich hier ähnlich wie bei den Messreihen mit Parallelkapazität und einem Strombegrenzungswiderstand $R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$. Die Kennzahlen beider Messungen finden sich in Tabelle 6.9.

Tabelle 6.9: Mittelwerte der Konditionierungskennzahlen bei Messungen mit einer Parallelkapazität $C_p = 1,13 \text{ nF}$

	Polarität	U_R in kV		η_A		η_D	
		\bar{U}_R in kV	σ in kV	$\bar{\eta}_A$	σ	$\bar{\eta}_D$	σ
Schlagweite: groß T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Positiv	87,7	47,8	0,52	0,02	0,53	0,55
Schlagweite: klein T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Positiv	34,9	14,7	0,51	0,04	0,76	0,06
Schlagweite: groß T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Negativ	86,75	18,6	0,52	0,08	0,17	0,21
Schlagweite: klein T_1/T_2 : 1,2/50 Keramik: 70 mm	Negativ	35,75	27,08	0,47	0,06	0,74	0,31

Beim Betrachten der Kennzahlen wird deutlich, dass sich die Werte nur durch die Polarität unterscheiden. Der Strombegrenzungswiderstand hat keinen merklichen Einfluss auf die Messergebnisse. Beim Vergleich zwischen den Kennzahlen mit und ohne Parallelkapazität zeigt sich, dass sich U_R verringert. Bei positiver Polarität verringert er sich nicht merklich, bei negativer dafür um 56 %. Der absolute Konditionierungsgrad η_A verringert sich polaritätsunabhängig um 38 % – 40 %. Der Dekonditionierungsgrad η_D steigt um 32 % - 48 %. Eine Ausnahme davon bildet der Verlauf der Konditionierung mit positiven 56/204-Stoßspannungen. Hier ist η_D sehr gering. Beim Betrachten des Konditionierungsverlaufs zeigt sich, dass die Werte von KLO8N annähernd konstant sind. Auch bei KLO6N findet keine wirkliche Konditionierung statt. Der Verlauf zeigt konstante Werte die durch einzelne gelegentliche dekonditionierende Durchschläge unterbrochen werden. Es ist ersichtlich, dass beim Konditionieren die Parallelkapazität zum Konditionierungsobjekt so gering wie möglich gehalten werden sollte.

6.1.5 Einfluss der Keramik auf das Konditionierungsverhalten

Durch den keramischen Isolator entstehen zwangsläufig Tripelpunkte (Vakuum-Metall-Keramik). Diese sind neben der Stelle mit der geringsten Schlagweite die dielektrische Schwachstelle an den Prüfkörpern. Eine Aussage darüber, an welcher Stelle der Durchschlag stattfand, ist jedoch nicht möglich. Nach der Konditionierung wurden daher die Prüfkörper geöffnet und anhand der Lichtbogenspuren wurde deutlich, dass auch Durch-

schläge stattgefunden haben, deren Ursprung ein Tripelpunkt war. Dieser Befund ist insofern bemerkenswert, als dass sich die Tripelpunkte im elektrischen Feldschatten des Metaldampfschirms befinden. In Abbildung 6-25 sieht man einen schematischen Schnittbildausschnitt eines Prüfkörpers.

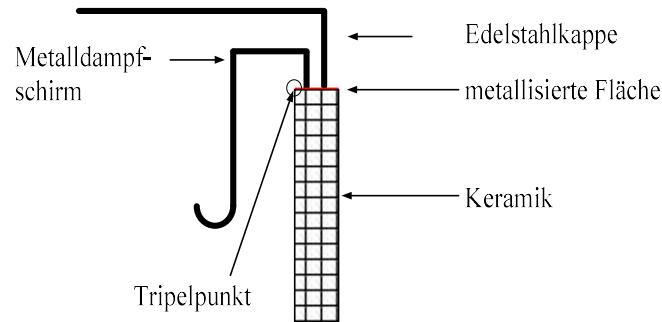


Abbildung 6-25: Schematischer Schnittbildausschnitt eines Prüfkörpers

Es ist erkennbar, dass der Tripelpunkt an dem Ende der metallisierten Keramikoberfläche durch den Metaldampfschirm im Feldschatten liegt. Durch eine Aufladung der Keramik, leitende Schichten durch Bedampfung und die extrem dünne Metallisierungsschicht kann es trotzdem zu einer Entladung kommen, deren Ursprung der durch den Metaldampfschirm geschirmte Tripelpunkt ist [Gra14].

In Abbildung 6-26 wird ein geöffneter Prüfkörper gezeigt. Die Lichtbogenspuren an den Tripelpunkten sind rot umrandet. Lichtbogenspuren, die von Lichtbögen stammen, die am Rand der Metaldampfschirme entstanden sind, sind blau umrandet.



Abbildung 6-26: Metaldampfspuren auf Prüfkörperkeramik eines geöffneten Prüfkörpers (KLO4O)

Nicht jeder Lichtbogen hinterlässt eine deutlich sichtbare Spur. Anhand der Spuren kann deshalb nicht gesagt werden, wie das Verhältnis zwischen der Anzahl von Tripelpunkt-durchschlägen und Metaldampfschirmdurchschlägen ist. Aus diesem Grund wurden Messreihen an besonderen Prüfkörpern durchgeführt, die keinen Metaldampfschirm aufwiesen und bei denen die Ursprünge der Durchschläge die Tripelpunkte sein müssen. Die Konditionierungsverläufe der Prüfkörper finden sich in den nächsten Abbildungen. Die Wechselspannungsverläufe sind in Abbildung 6-27 und Abbildung 6-28 dargestellt. Abbildung 6-29 und Abbildung 6-30 zeigen die Verläufe bei Stoßspannungskonditionierung. In dieser Messreihe wurde mit einer 16/80-Stoßspannung konditioniert. Die Messungen wurden an Prüfkörpern mit einer 45-mm-Keramik durchgeführt. Es wurden auch Messungen mit Prüfkörpern ohne Metaldampfschirm und einer Keramik von 70 mm Länge durchgeführt. Die Messwerte der 45-mm- und 70-mm-Keramik haben sich aber nicht unterschieden.

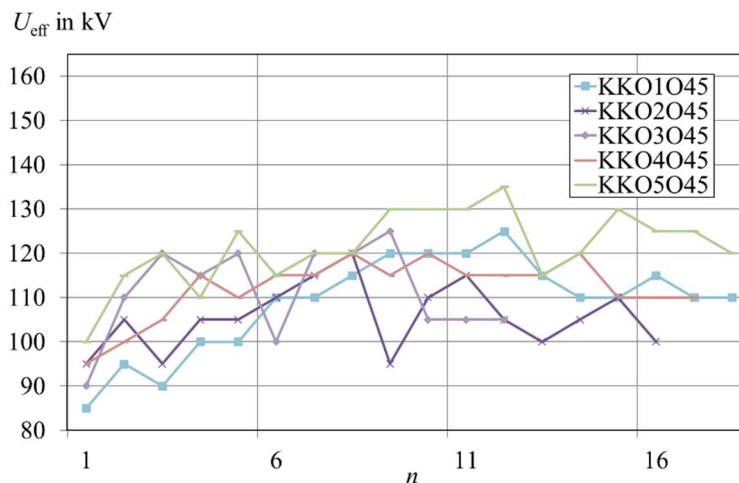


Abbildung 6-27: Konditionierungsverläufe für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKOXO mit 45-mm-Keramik

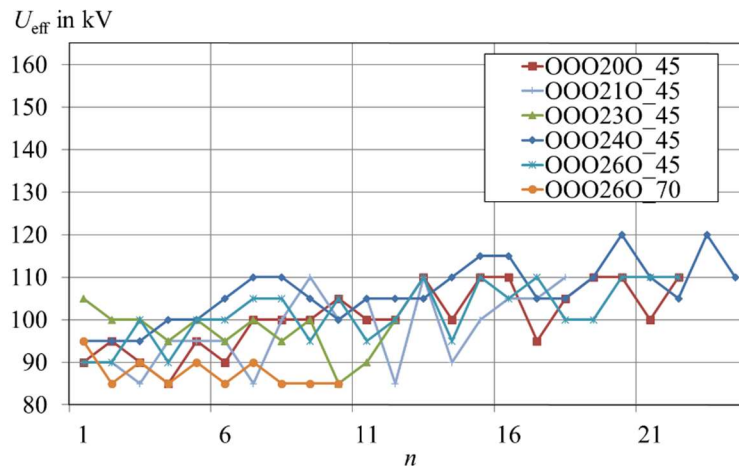


Abbildung 6-28: Konditionierungsverläufe für Wechsellspannungsprüfung von Prüfkörpern ohne Dampfschirm mit 45-mm- und 70-mm-Keramik

Beim Betrachten der Verläufe wird deutlich, dass sich die Varianten mit und ohne Dampfschirm nicht merklich voneinander unterscheiden. Auffällig ist jedoch, dass der Prüfkörper ohne Dampfschirm und mit 70-mm-Keramik den am niedrigsten liegenden Konditionierungsverlauf hat, obwohl er die größte Schlagweite besitzt. Das führt zu der Annahme, dass eine bessere Schirmung der Tripelpunkte effektiver für die dielektrische Festigkeit sein dürfte als eine Erhöhung der Schlagweite.

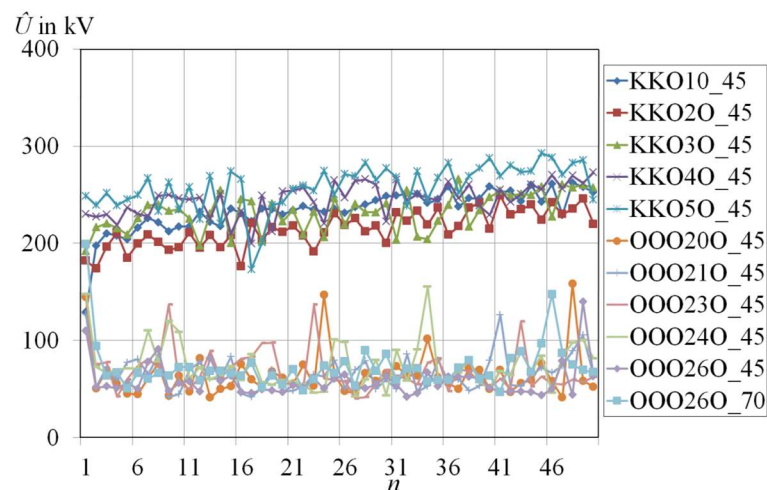


Abbildung 6-29: Konditionierungsverläufe mit positiver 16/80-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei Prüfkörpern mit und ohne Dampfschirm mit 45-mm- und 70-mm-Keramik

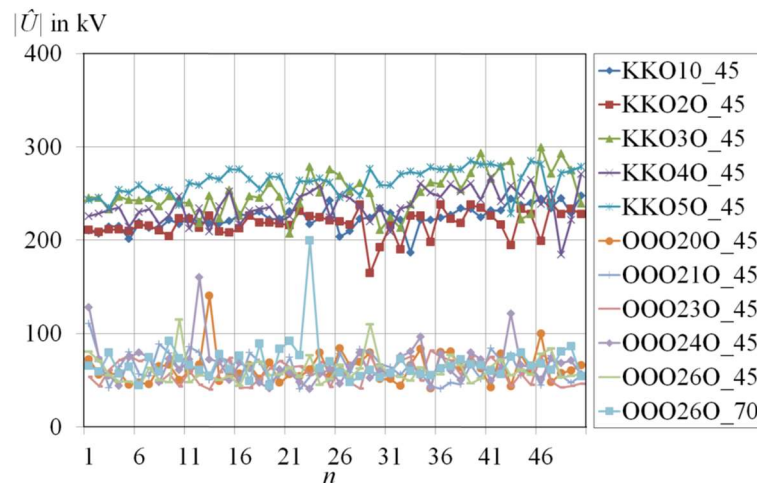


Abbildung 6-30: Konditionierungsverläufe mit negativer 16/80-Stoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei Prüfkörpern mit und ohne Dampfschirm mit 45-mm- und 70-mm-Keramik

Bei den Konditionierungsverläufen mit Stoßspannung zeigt sich kein Unterschied zwischen den Prüfkörpern mit 45-mm- und 70-mm-Keramik. Die dielektrische Festigkeit liegt aber weit unter der Festigkeit von Prüfkörpern mit Dampfschirm. Ein Vergleich von Prüfkörpern mit Metaldampfschirm ist in diesem Fall nicht sinnvoll. Die Prüfkörper ohne Metaldampfschirm weisen zwar eine größere Schlagweite zwischen den Elektroden auf, aber eine geringere Spannungsfestigkeit. Ein konditionierendes/dekonditionierendes Verhalten ist hier nicht vorhanden, weshalb eine Ermittlung der Kennzahl nicht sinnvoll ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Großteil der Durchschläge an den Prüflingen mit Metaldampfschirmen zwischen den Metaldampfschirmen stattfinden muss, ansonsten wäre die dielektrische Festigkeit viel geringer. Es ist nicht möglich zu sagen, ob die stark dekonditionierenden Durchschläge immer Tripelpunktdurchschläge sind, da diese nicht immer sichtbare Spuren hinterlassen. Prüfkörper mit einem sehr hohen Dekonditionierungsfaktor z. B. weisen keine erhöhte Anzahl von sichtbaren Spuren auf.

Beim Vergleich der Kennzahlen der Varianten mit unterschiedlicher Keramiklänge und gleicher Schlagweite zeigt sich, dass sich die unterschiedliche Keramiklänge hauptsächlich auf η_D auswirkt. Ein Vergleich der Kennzahlen von Prüfkörpern mit unterschiedlichen Keramiklängen findet sich in Tabelle 6.10.

Tabelle 6.10: Kennzahlen der Stoßspannungskonditionierung von Prüfkörpern mit unterschiedlicher Keramiklänge.

Prüfkörper	\bar{U}_R in kV	$\bar{\eta}_A$	$\bar{\eta}_D$
Schlagweite 14,2 mm Keramik: 45 mm Positiv Polarität	72,22	0,9	0,44
Schlagweite 14,2 mm Keramik: 45 mm Negative Polarität	41,4	0,9	0,67
Schlagweite 14,3 mm Keramik: 70 mm Positiv Polarität	87,94	0,83	0,21
Schlagweite 14,3 mm Keramik: 70 mm Negative Polarität	80,16	0,81	0,27

Neben der Reduzierung von η_D wird auch deutlich, dass η_A gesunken ist. Bei der 45-mm-Keramik zeigt sich eine deutliche Polaritätsabhängigkeit. Ob diese durch die kürzere Keramik verursacht wird kann nicht eindeutig geklärt werden, da die Prüfkörper mit der 70-mm-Keramik unsymmetrisch aufgebaut sind. Durch die unterschiedlichen Dampfschirmgeometrien ergibt sich aber auch eine unterschiedliche Feldbelastung der Kontakte. Auf diese soll in Kapitel 7 näher eingegangen werden.

6.2 Verhalten der elektrischen Parameter bei konditionierenden und dekonditionierenden Durchschlägen

Im vorherigen Kapitel wurden verschiedene Einflüsse auf das Konditionierungsverhalten der Prüfkörper untersucht. Es zeigte sich, dass das Konditionierungsverhalten bei Stoßspannungsbeanspruchung maßgeblich von dem verwendeten Strombegrenzungswiderstand beeinflusst wird. In diesem Kapitel sollen daher die Parameter Spannung, Strom und Zeit näher betrachtet werden. Der typische Stromverlauf bei einem Vakuumdurchschlag mit Stoßspannungsbeanspruchung ist in Abbildung 6-31 dargestellt.

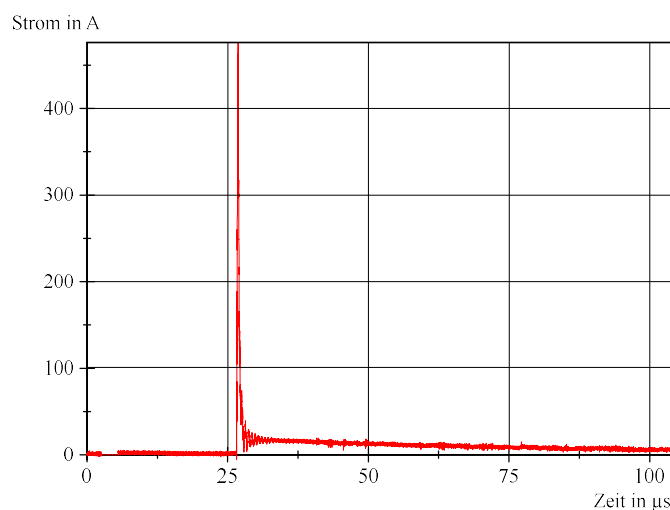


Abbildung 6-31: Stromverlauf bei einem Durchschlag mit einer 16/80-Stoßspannung

Der typische Stromverlauf, wie er auch von Leusenkauf [Leu12] beschrieben wurde, ist erkennbar. Der Durchschlagstrom besteht aus zwei Komponenten. Am Anfang des Durchschlags tritt ein sehr hoher kurzer Stromimpuls auf, dessen Höhe sich durch den Strombegrenzungswiderstand R_{begrenz} ergibt. Danach fließt ein niedrigerer, langsam abklingender Strom. Dieser ist abhängig von der Lastkapazität C_L , die aus der Eigenkapazität des Prüflings sowie den Parasitärkapazitäten von Spannungsteiler und Aufbau besteht. Um den Einfluss beider Komponenten zu untersuchen, wird neben dem Strommaximum \hat{I} auch die Ladung Q betrachtet.

Der Einfluss der verschiedenen Strombegrenzungswiderstände soll jeweils exemplarisch an einem Verlauf untersucht werden. Abbildung 6-32 zeigt den Konditionierungsverlauf je eines Prüfkörpers, der mit Normblitzstoßspannung, 16/80-Stoßspannung und 30/115-

Stoßspannung bei positiver Polarität konditioniert wurde. Konditionierende Durchschläge sind rund markiert, dekonditionierende eckig. Der Konditionierungsverlauf mit negativer Polarität ist in Abbildung 6-33 gezeigt.

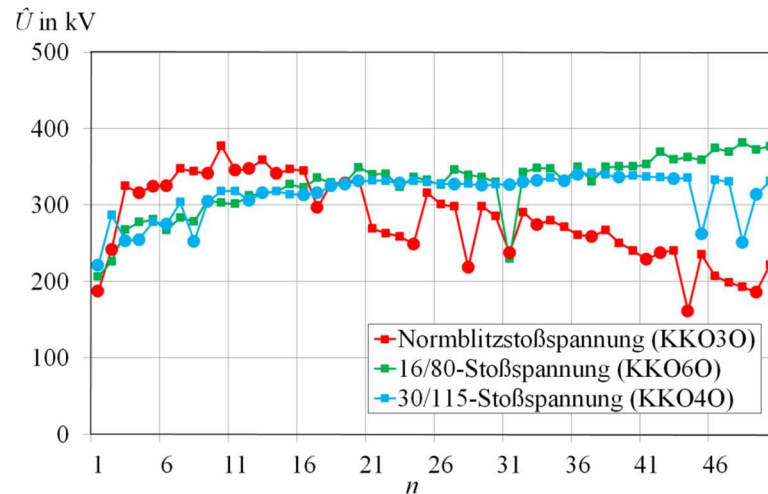


Abbildung 6-32: Konditionierungsverläufe mit konditionierenden (rund) und dekonditionierenden (eckig) Durchschlägen bei positiver Polarität

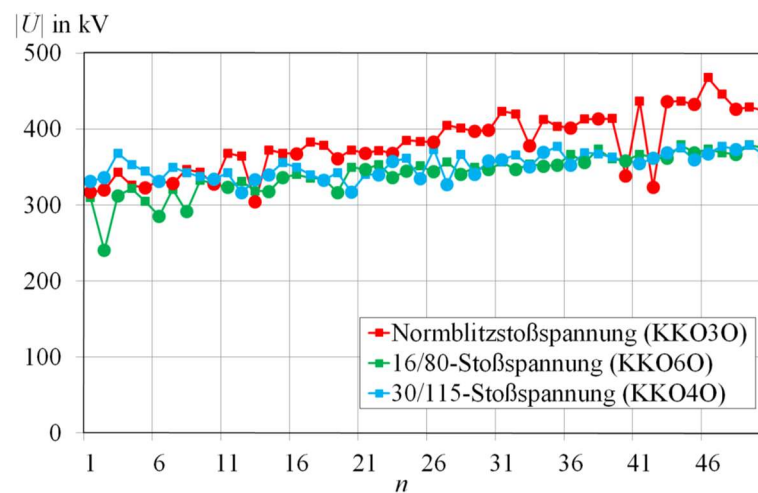


Abbildung 6-33: Konditionierungsverläufe mit konditionierenden (rund) und dekonditionierenden (eckig) Durchschlägen bei negativer Polarität

Zur Bestimmung des Einflusses der Kreisparameter auf den Strom muss als erstes überprüft werden, wie sich der Stromverlauf bei Durchschlägen mit gleicher Spannungshöhe und gleichen Konditionierungskreiselementen verhält. Dazu werden die Durchschlagspannungswerte in Klassen mit einer Klassenbreite von 10 kV eingeteilt. Um statistisch

sichere Aussagen treffen zu können, wurden nur die Werte untersucht, bei denen mehr als drei Durchschläge in einer Klasse lagen. Die Ergebnisse mit positiver Polarität finden sich in Tabelle 6.11 und die mit negativer Polarität in Tabelle 6.12.

Tabelle 6.11: Vergleich von U , I und Q bei positiver Polarität

Klasse		Normblitzstoßspannung			16/80-Stoßspannung			30/115-Stoßspannung		
		U in kV	\hat{I} in A	Q in mC	U in kV	\hat{I} in A	Q in mC	U in kV	\hat{I} in A	Q in mC
240-250 kV	\bar{X} σ	249,9 4,1	117,7 25,1	1,02 0,2						
250-260 kV	\bar{X} σ	265,1 3,69	117,7 34,2	1,15 0,35				252,8 1,6	217 91,3	0,31 0,15
290-300 kV	\bar{X} σ	296 3,64	132,5 37,9	0,98 0,63						
310-320 kV	\bar{X} σ							315,8 2,1	292,5 71,5	0,22 0,14
320-330 kV	\bar{X} σ	326,5 2,15	208,4 12,8	11,5 0,07	326 2,79	266,2 38,5	0,8 0,42	327,2 1,37	365 137,4	0,17 0,04
330-340 kV	\bar{X} σ				334,9 3,32	388,7 19,5	0,52 0,3	333,8 2,92	334,7 104,54	0,19 0,09
340-350 kV	\bar{X} σ	344,7 2,58	211 15,3	1,59 0,15	346,1 3,34	312,3 50,54	1,06 0,36			
350-360 kV	\bar{X} σ				353,6 4,48	342,4 16,7	0,33 0,17			

Tabelle 6.12: Vergleich von U , I und Q bei negativer Polarität

Klasse		Normblitzstoßspannung			16/80-Stoßspannung			30/115-stoßspannung		
		U in kV	\hat{I} in A	Q in mC	U in kV	\hat{I} in A	Q in mC	U in kV	\hat{I} in A	Q in mC
320-330 kV	\bar{X} σ	325,5 2,35	284,2 83,5	2,01 0,36						
330-340 kV	\bar{X} σ				333,8 2,02	334,17 78	0,92 0,42	335,7 3,22	510,6 106,7	0,34 0,06
340-350 kV	\bar{X} σ				344,2 3,22	381,38 26,69	0,56 0,33	342,1 1,59	494,5 62,57	0,48 0,25
350-360 kV	\bar{X} σ				353,7 2,81	378,7 47,67	1,22 0,41	355,1 3,67	566,75 73,4	0,34 0,03
360-370 kV	\bar{X} σ	366,4 2,78	312,86 104,86	1,85 0,23	364,8 3,42	387,13 29,59	0,85 0,45	366,4 2,99	583,16 74,15	0,39 0,14
370-380 kV	\bar{X} σ	374,5 3,4	292,2 123,02	1,86 0,49	375,2 2,77	408,4 46,13	1,06 0,56	375,7 2,23	484,8 159,34	0,59 0,3
380-390 kV	\bar{X} σ	383,6 1,52	199,25 47,69	1,69 0,43						
400-410 kV	\bar{X} σ	403 1,99	374,25 148,54	2,08 0,16						
410-420 kV	\bar{X} σ	413,2 0,55	323 105,71	2,1 0,42						
420-430 kV	\bar{X} σ	424,8 3,24	299,8 60,83	2,15 0,17						
430-440 kV	\bar{X} σ	435,5 2,14	264 129,46	2,19 0,89						

Beim Betrachten der Streuung σ wird deutlich, dass diese bei der Spannung sehr gering ist. Sie beträgt maximal 2 % des Mittelwerts. Beim Strom und der Ladung ist die Streuung dagegen größer. Hier liegt die Streuung der Stromscheitelwerte im Bereich von 16 % - 42 %, bei der Ladung im Bereich 40 % - 64 %. Der Grund hierfür liegt im Zeitpunkt des Spannungszusammenbruchs und dem Verhalten danach. Die Ermittlung des Konditionierungsverlaufs wurde in Anlehnung an die IEC 60060-1(2010-09) durchgeführt. Nach Norm wird bei der dielektrischen Prüfung mit Blitzstoßspannung nur der Maximalwert der Spannung betrachtet, auch wenn es erst später zu einem Spannungszusammenbruch im Rücken kommt und die tatsächliche Spannung beim Durchschlag geringer ist. Abbildung 6-34 zeigt Strom- und Spannungsverlauf von Durchschlägen mit Normblitzstoßspannung mit verschiedenen Entladeverzugszeiten.

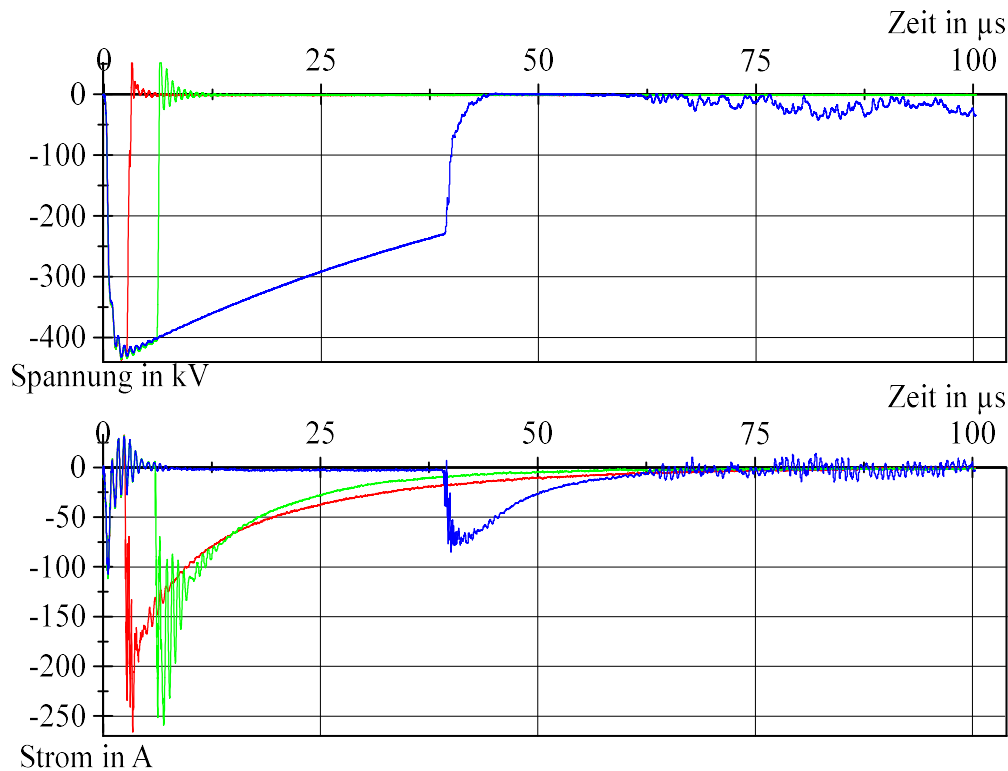


Abbildung 6-34: Strom und Spannungsverlauf von Durchschlägen mit Normblitzstoßspannung mit verschiedenen Entladeverzugszeiten

Generell kann gesagt werden, dass die Höhe des Stroms bei Prüfungen mit Normblitzstoßspannung abhängig vom Zeitpunkt des Spannungszusammenbruchs ist. Es besteht aber kein linearer Zusammenhang. Bei einer detaillierteren Betrachtung zeigt sich, dass es bei kleinen Unterschieden in der Entladungsverzugszeit zu unterschiedlichen, nicht damit korrelierten Stromwerten kommt. Das ist durch die unterschiedliche Feldverteilung an den Emittern erklärbar, die bei jedem Durchschlag unterschiedlich sind. Ein weiterer Punkt ist, dass die überlagerte Oszillation des Stroms nicht exakt gemessen werden kann. Diese wird durch das Verlöschen und Neuzünden der Kathodenflecken erzeugt. Nach Lippmann liegt deren Frequenz im MHz-Bereich [Lip03]. Die Grenzfrequenz des Stromwandlers liegt aber nur bei 50 MHz, so dass Frequenzen oberhalb von 5 MHz nicht genau wiedergegeben werden.

Aufgrund der längeren Impulsdauer ist die Streuung bei den längeren Impulsen größer. Bei den längeren Impulsen kommt es neben dem unterschiedlichen Zeitpunkt des Spannungszusammenbruchs auch zu einer vollständigen oder teilweisen Wiederverfestigung

der Isolationsstrecke, was zu einer starken Streuung der während des Durchschlags fließenden Ladung Q führt. Das ist in Abbildung 6-35 beispielhaft zu sehen.

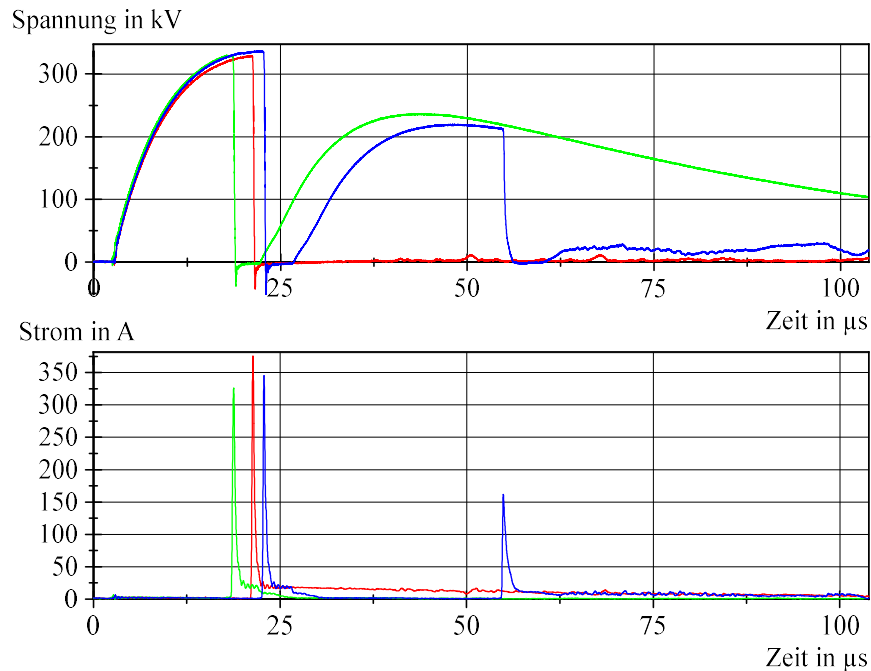


Abbildung 6-35: Strom- und Spannungsverlauf von Durchschlägen mit 16/80-Stoßspannung mit verschiedenen Zündverzugszeiten

Beim Betrachten der Stromverläufe wird deutlich, dass es bei einem kompletten Durchschlag (rot) nach dem ersten Stromimpuls zu einem langsam abklingenden Folgestrom kommt. Im Gegensatz dazu erfolgt bei einer Wiederverfestigung der Isolierung ein sofortiger Stromrückgang zu Null (grün). Es kann auch vorkommen, dass sich die Isolierstrecke nach einem Durchschlag verfestigt und danach ein weiterer Durchschlag erfolgt, oder dass ein Durchschlag mit einer hohen Lichtbogenspannung entsteht (blau). Da nach Lippmann und Slade die maximale Lichtbogenbrennspannung nur einige 100 V betragen kann, können die Durchschläge mit erhöhter Lichtbogenspannung ein Anzeichen dafür sein, dass der Durchschlag entlang der Keramik stattgefunden hat [Lip03] [Sla08].

Der Stromverlauf bei einem Durchschlag kann sich sehr unterschiedlich entwickeln. Das führt dazu, dass nicht genau geklärt werden kann, wie groß der Strom bei einer bestimmten Durchschlagspannung ist, selbst wenn der Momentanspannungswert, bei dem es zum Durchschlag kommt und nicht der Maximalwert betrachtet wird.

Beim Betrachten des Stromscheitelwerts beim Durchschlag zeigt sich, dass sich dieser mit steigendem Strombegrenzungswiderstand erhöht. Dieses Verhalten ist völlig gegensätzlich zu dem in der Literatur, insbesondere bei Leusenkamp, beschriebenen. Danach verhält sich der Strom nach dem Ohm'schen Gesetz, und mit steigendem Widerstand R_{begrenz} fällt der Scheitelwert des Stroms. Der Unterschied ist, dass viele Untersuchungen bei Normblitzstoßspannung durchgeführt wurden. Da in dieser Arbeit durch den Strombegrenzungswiderstand auch die Impulsform verändert wird, ändert sich auch die enthaltene Energie. Für einen längeren Impuls wird mehr Energie benötigt als für einen kürzeren Impuls bei gleicher Spannungshöhe. Die Energie wird durch die Stoßkondensatoren des Marxgenerators zur Verfügung gestellt. Kommt es nun zu einem Durchschlag mit der erhöhten Energie, entlädt sich diese direkt, und es kommt zu einem höheren Stromfluss trotz des höheren Strombegrenzungswiderstands. Entgegen der allgemein vorherrschenden Meinung [Leu12] [Sla08] ist es ersichtlich, dass ein höherer Durchschlagsstrom nicht zu mehr Dekonditionierung führen muss, sondern die Konditionierung fördern kann.

Die zweite Komponente des Stroms hingegen ist proportional zum Strombegrenzungswiderstand. Jedoch ist es schwer, die erste und zweite Komponente beim Durchschlag mit Normstoßspannung zu trennen, da der Übergang dort fließend ist. Dieser Effekt ist bei längeren Impulsen besser und deutlicher zu erkennen.

Die Ladung Q ist viel besser geeignet, um den Stromverlauf bei einem Durchschlag zu bewerten, besonders bei längeren Impulsen. Dadurch wird neben der Höhe des Stroms auch die Stromflusszeit bewertet. Um einen Zusammenhang zwischen der Ladungsmenge und konditionierenden bzw. dekonditionierenden Durchschlägen zu finden, wurde diese bei Durchschlägen untersucht. Damit so wenige Ausreißer wie möglich die Messwerte beeinflussen, wurden nur die Durchschläge 20 bis 30 betrachtet. Dadurch sollten zum einen die ersten herstellungsbedingten Emitter schon entfernt sein, zum anderen sollte die Oberfläche durch den Konditionierungsvorgang noch nicht so stark beschädigt worden sein, dass die Spannungsfestigkeit dauerhaft reduziert ist. Das gilt besonders bei der Konditionierung mit Normblitzstoßspannung.

Beim Vergleich der Ladung während der Durchschläge mit Normblitzstoßspannung konnte kein großer Unterschied zwischen der Ladungsmenge bei konditionierenden oder

dekonditionierenden Durchschlägen festgestellt werden. Es zeigte sich aber, dass die Anzahl der dekonditionierenden Durchschläge überwog. Die Ladungsmenge lag im Bereich 1,1 mC – 2,3 mC.

Bei Durchschlägen mit der 16/80-Stoßspannung hingegen gab es einen Unterschied. Die Ladungsmenge bei konditionierenden Durchschlägen lag im Bereich 0,3 mC – 0,4 mC, während die Ladungsmenge der meisten dekonditionierenden Durchschläge im Bereich 0,8 mC – 1,4 mC lag. Es gab hier auch Durchschläge, bei denen die Ladung im Bereich um 0,4 mC lag, diese waren aber die Ausnahme. Bei den konditionierenden Durchschlägen kam es immer einige Mikrosekunden nach dem Durchschlag zu einer Wiederverfestigung der Isolationsstrecke und damit zur Unterbrechung des Stroms. Dies war bei den dekonditionierenden Durchschlägen nicht der Fall, was zu einem starken Anstieg der Ladung gegenüber den konditionierenden Durchschlägen führte.

Bei Durchschlägen mit der 30/115-Stoßspannung konnte auch eine höhere Ladungsmenge bei dekonditionierenden Durchschlägen festgestellt werden. Hier lag die Ladungsmenge im Bereich um 0,3 mC bei konditionierenden und zwischen 0,4 mC und 0,8 mC bei dekonditionierenden Durchschlägen. Auch hier resultierte der Unterschied bei der Ladungsmenge aus der sich wiederverfestigenden Isolationsstrecke, wobei es bei dieser Stoßspannungsform nur bei sehr wenigen Durchschlägen vorkam, dass sich die Isolationsstrecke nicht mehr verfestigte. Generell kam es bei der 30/115-Stoßspannung auch zu einer geringeren Anzahl von stark dekonditionierenden Durchschlägen.

Beim Betrachten der Konditionierungsverläufe zeigen sich teils starke Einbrüche der Spannungsfestigkeit. Bei Konditionierungsverläufen mit Normblitzstoßspannung zeigt sich kein Unterschied der Ladungsmenge bei einem stark dekonditionierenden oder stark konditionierenden Durchschlag. Bei den Konditionierungsverläufen mit der 16/80- und 30/115-Stoßspannungen zeigt sich bei den stark dekonditionierenden Durchschlägen auch kein abweichendes Verhalten bezüglich der Ladung, gegenüber weniger stark dekonditionierenden Durchschlägen. Wenn anschließend aber ein stark konditionierender Durchschlag stattfand, stieg die Ladung auf einen Wert an, der sonst für dekonditionierende Durchschläge typisch ist (Abbildung 6-32; 16/80 Impuls Durchschlag 30-32; 30/115 Impuls Durchschlag 44-46). Dieses Verhalten lässt sich damit erklären, dass der dekonditionierende Durchschlag die Oberfläche stark beschädigt und Elektronenemitter

erzeugt, die eine hohe mikroskopische Feldstärke hervorrufen. Da die angelegte Spannung sehr viel höher ist als die benötigte Durchschlagsspannung, kommt es bei diesem Durchschlag nicht zu einem Wiederverfestigen der Isolationsstrecke, und der Strom fließt über die gesamte Impulsdauer.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Ob ein Durchschlag konditionierend oder dekontitionierend ist, hängt von der Ladung ab und nicht von der Stromamplitude. Eine geringere Ladung, die bei einem Durchschlag fließt, führt zu konditionierenden Durchschlägen, eine größere Ladungsmenge zu dekontitionierenden. Aus den elektrischen Parametern des Durchschlags kann aber kein Rückschluss auf die Höhe des konditionierenden/dekontitionierenden Effekts geschlossen werden. Damit die Konditionierung optimalen durchgeführt wird, muss also die Ladungsmenge beim Durchschlag begrenzt werden. Dies kann zum einen über die Stromamplitude mithilfe von Widerständen geschehen, zum anderen aber auch über die Länge des Stromimpulses.

6.3 Einfluss von weiteren Herstellungsfaktoren auf die dielektrische Festigkeit

Die im vorherigen Kapitel vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass eine große Streuung bei den Messwerten auftritt. Ein Grund für die Streuung sind die nicht vorhersehbaren Oberflächenbedingungen nach einem Durchschlag und damit auch die dort unbekannten Feldstärken. Eine weitere Ursache für die Streuung können aber auch Abweichungen bei der Fertigung der Prüfkörper sein. Die Dampfschirme werden maschinell gefertigt, hier sollten die Abweichungen von Länge, Durchmesser und Biegeradien kleiner 1 mm sein. Ein Punkt, bei dem es zu größeren Abweichungen kommen kann, die für das dielektrische Verhalten kritisch sind, ist der Abstand zwischen dem Metaldampfschirm und dem Keramikisolator, der sich in der Exzentrizität widerspiegelt. Dieses Kapitel soll klären, ob und wie stark diese Faktoren das dielektrische Verhalten beeinflussen.

6.3.1 Exzentrizität

Exzentrizität ist die Abweichung der Mittelpunkte von Keramik und Metaldampfschirm. Diese kann durch den Abstand Metaldampfschirm-Keramik entlang des gesamten Umfangs bestimmt werden. Die Ursache der Exzentrizität liegt im Herstellungsverfahren, das

nach dem „Final Seal Brazing“ Verfahren durchgeführt wird. Dabei werden alle Teile und die Lotfolie in Position gebracht und anschließend im Vakuumofen verlötet und ausgeheizt. Wenn der Metaldampfschirm nicht genau mittig zentriert ist oder sich durch den Erwärmungsprozess verschiebt, kommt es an einer Stelle zu einem kleineren Abstand zwischen dem Metaldampfschirm und der Keramik und auf der gegenüberliegenden zu einem größeren. Durch den geringen Nennabstand von 2,5 mm, die hohen anliegenden Spannungen und die Feldverdrängung kann es durch eine kleine Abweichung zu einer starken Veränderung der Feldstärke kommen (siehe Tabelle 6.14).

Die Exzentrizität wurde mit einem Linearpotentiometer bestimmt. Dazu wurden die geöffneten Prüfkörper in eine Messeinrichtung eingespannt, bei der alle $3,6^\circ$ ein Messwert aufgenommen wurde (insgesamt 100 Messpunkte). Da der Messbereich sehr klein ist, wurde jede Messung dreimal durchgeführt und aus den einzelnen Werten der Mittelwert gebildet. Eine vereinfachte Darstellung der Messeinrichtung zeigt Abbildung 6-36.

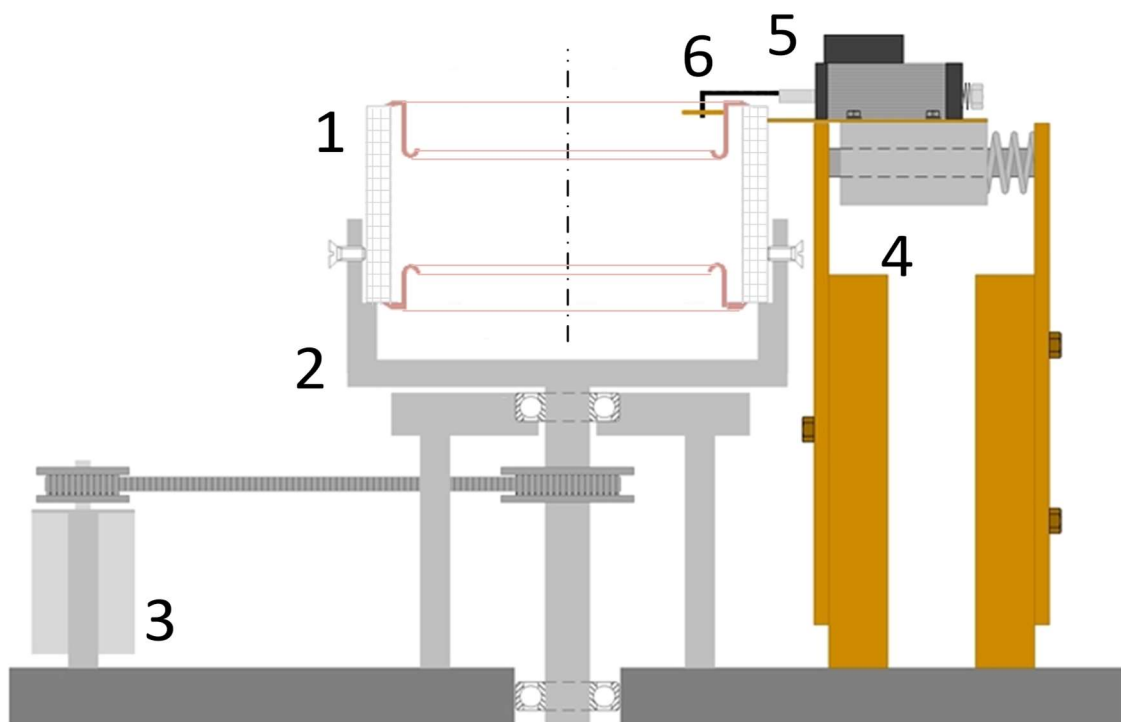


Abbildung 6-36: Vereinfachte Darstellung der Messeinrichtung zur Bestimmung der Exzentrizität. (1) Prüfling; (2) Topf zum Einspannen des Prüflings; (3) DC-Getriebemotor; (4) Mechanik zum Ausgleichen der Exzentrizität; (5) Abstandssensor; (6) Wegaufnehmer. Nach [Eng14]

Der Prüfkörper ist in einem drehbaren Stativ eingespannt. Das Linearpotentiometer wird mithilfe einer Feder von außen gegen die Keramik gedrückt, ebenso wie der Wegaufnehmer, der über ein Laufrad an der Innenseite des Metaldampfschirms anliegt. Dadurch sind Messfehler durch schief eingespannte Prüfkörper nicht möglich. Der Aufbau misst nicht den genauen Abstand zwischen Metaldampfschirm und Keramik, sondern den Abstand zwischen Keramikaußenwand und Schirm. Eine einfachere und übersichtlichere Auswertung kann über den relative Abstand s_{rel} gemacht werden. Der relative Abstand ist relativ zum jeweils minimalen Abstand s_{min} eines jeden Prüfkörpers und berechnet sich nach Gleichung (6.8).

$$s_{\text{rel}} = s - s_{\text{min}} \quad (6.8)$$

Eine Zusammenfassung der Messergebnisse findet sich in Tabelle 6.13. Zur Überprüfung, ob die Zentriernoppen einen Einfluss auf die Exzentrizität haben und wie groß dieser ist, werden die Prüfkörper mit und ohne Zentriernoppen separat behandelt.

Tabelle 6.13: Zusammenfassung der Exzentrizitätsmessungen

	Mit Zentriernoppen	Ohne Zentriernoppen
$\bar{s}_{\text{rel,max}}$ in mm	0,81	1,02
σ in mm	0,33	0,29
$s_{\text{max,all}}$ in mm	1,8	1,62
$s_{\text{min,all}}$ in mm	0,31	0,7

Die Messungen wurden an insgesamt 31 Prüfkörpern mit Zentriernoppen und an 10 Prüfkörpern ohne Zentriernoppen vorgenommen. Es wurden nur Prüfkörper ohne gekröpfte Dampfschirme untersucht, da diese einen größeren Abstand Keramik-Metaldampfschirm haben und dadurch eine größere Abweichung als die anderen Metaldampfschirmgeometrien. Es zeigt sich, dass die Prüfkörper mit Zentriernoppen im Mittel eine kleinere Veränderung des relativen Abstands s_{rel} haben. Der Unterschied zwischen beiden Varianten ist aber sehr gering. Die Werte zeigen, dass sich der Metaldampfschirm im Extremfall um bis zu 0,9 mm verschiebt. Beim genauen Betrachten der Messwerte wird ersichtlich, dass es nicht nur zur Verschiebung der Dampfschirme kommen kann, sondern dass diese teilweise auch verformt sind. Besonders gut ist dies erkennbar, wenn ein Polarkoordinatensystem erstellt wird und die Werte darin eingetragen werden. Damit der Zusammenhang zwischen Messwerten und realer Anordnung besser darstellbar ist, werden die Messwerte nach Gleichung (6.9) umgeformt.

$$s_{\text{rel.pol}} = 2 \cdot s_{\text{rel,max}} - s_{\text{rel}} \quad (6.9)$$

Ein Beispiel für einen überwiegend nur verschobenen (blau) und einen deformierten Dampfschirm (rot) ist in Abbildung 6-37 dargestellt.

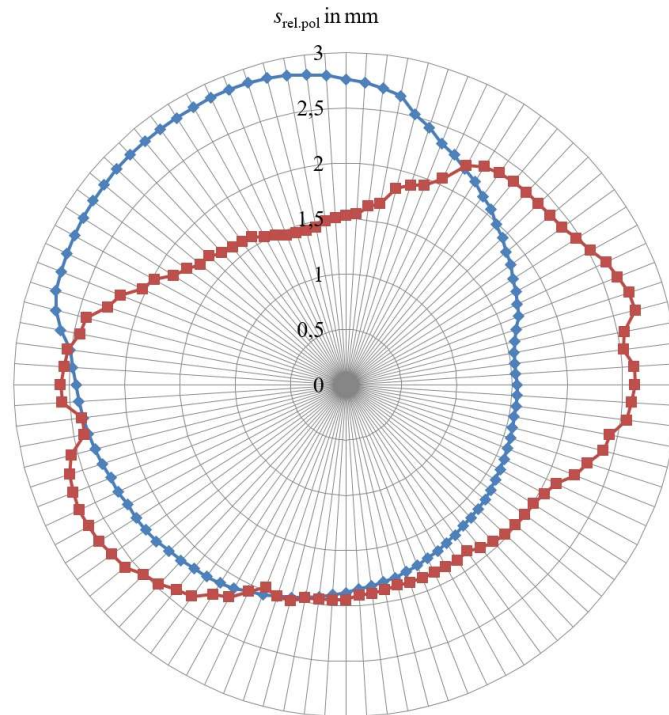


Abbildung 6-37: Polarkoordinatendarstellung eines exzentrisch verschobenen (blau) und eines deformierten Dampfschirms (rot)

Die ermittelten Abweichungen des Abstands zwischen Metaldampfschirm und Keramik führen zu einer Veränderung der elektrischen Feldverhältnisse. Diese Veränderung wurde mithilfe einer FEM-Simulation untersucht. Der Nennabstand zwischen Metaldampfschirm und Keramik beträgt 2,5 mm. Die Worst-Case-Betrachtung ist, dass der Normalabstand um den maximalen relativen Abstand verringert oder vergrößert ist. Das führt zu dem maximalen Abstand von 4,3 mm bei Prüfkörpern mit Zentriernoppen und 4,12 mm bei Prüfkörpern ohne Zentriernoppen. Der minimale Abstand beträgt 0,7 mm für Prüfkörper mit Zentriernoppen und 0,88 mm für Prüfkörper ohne Zentriernoppen. Abbildung 6-38 zeigt eine FEM-Simulation des elektrischen Felds eines Prüfkörpers mit Zentriernoppen bei Nennabstand. Detailliertere Information zur Simulation finden sich in Kapitel 7.

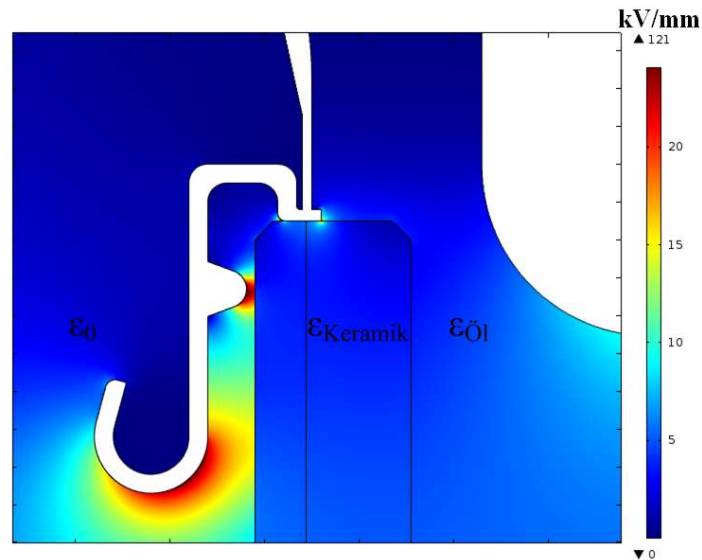


Abbildung 6-38: Ausschnitt 2D-FEM-Simulation eines Prüfkörpers KKOXN mit Nennabstand Metaldampfschirm-Keramik bei 365,3 kV ($\epsilon_{r,Keramik} = 9$, $\epsilon_{r,Öl} = 2,1$)

Es wird deutlich, dass die höchsten Feldstärken an der Spitze der Zentriernoppen und an der Verrundung des Schirms aufgetreten sind. Aus diesem Grund sollen auch nur diese Stellen betrachtet werden. Die ermittelten Werte finden sich in Tabelle 6.14. Als anliegende Spannung wurden die Werte von U_A aus Tabelle 6.1 angenommen. Die Feldstärke wurde an der Oberfläche des Metaldampfschirms ausgewertet. Bei Prüfkörpern mit Zentriernoppen wurde bei einem Abstand von 0,7 mm keine Stelle mit Zentriernoppen simuliert. Da die Noppe größer ist als 0,7 mm, würde das dazu führen, dass sich die Noppe innerhalb der Keramik befindet.

Tabelle 6.14: Ergebnisse der Simulation bei angenommener anliegender Spannung U_A lt. Tab. 6.1

Modell	Abstand Metall- dampf- schirm-Kera- mik in mm	E_{\max} an Zentriernoppen in kV/mm	E_{\max} an Bie- gung HS in kV/mm	E_{\max} an Bie- gung Erde in kV/mm
KKOXO	2,5		29,2	29,2
70-mm- Keramik	4,12		27,9	27,9
	0,88		36,4	36,4
KKOXN	2,5	37,5	26,5	26,5
70-mm- Keramik	4,3	16,9	23,5	23,5
	0,7	-	31,0	31,0
KLOXO	2,5		42,6	61,4
70-mm- Keramik	4,12		41,3	53,4
	0,88		67,8	94,6
KLOXN	2,5	38,3	35,1	51,8
70-mm- Keramik	4,3	16,2	34,2	44,6
	0,7	-	64,2	87,2
KKOXO	2,5		37,0	37
45-mm- Keramik	4,12		33,7	33,7
	0,88		59,3	59,3

Die Simulation zeigt, dass sich die Feldstärken bei einer Verringerung des Abstands stark erhöhen. Um zu überprüfen, ob diese Erhöhung der makroskopischen Feldstärke zu einer lokal erhöhten Anzahl von Durchschlägen führt, wurde die Keramik auf Spuren von Metalldampf untersucht. Abbildung 6-39 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Metall-
dampfspuren, die auf der Keramik vorgefunden wurden

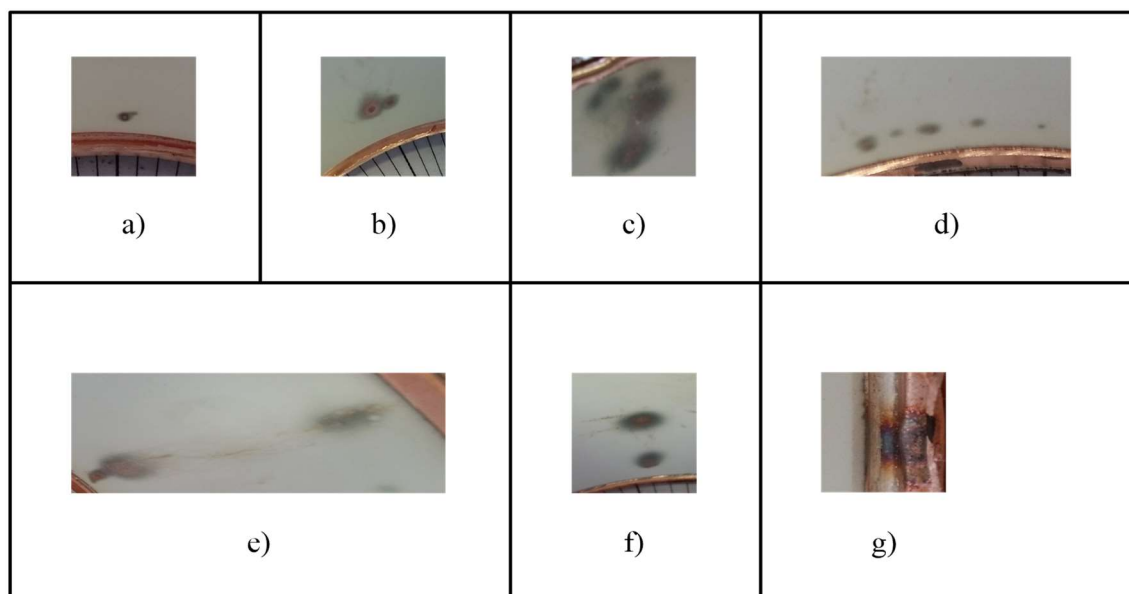


Abbildung 6-39: Übersicht der Metalldampfspuren auf der Keramik; Erklärungen im Text

Die Metaldampfspur in Abbildung 6-37 a) ist das typische Erscheinungsbild von Metaldampfflecken, die an der Keramik gegenüber von Zentriernoppen auftreten. Bei Prüfkörpern mit Zentriernoppen überwiegen diese Spuren. Einige Überschläge hinterlassen stark konzentrierte Kupferspuren, wie in b) zu sehen ist. Diese sind meist etwas größer als die in a) gezeigten Spuren und haben auch keine Zentriernoppe als Ursprung. Sehr häufig treten auch mehrere diffuse Flecken nebeneinander auf, wie sie in c) und d) zu sehen sind. Diese Flecken können in unterschiedlichen Größen auftreten. Ein Überschlag entlang der Keramik ist in e) dargestellt. Hier zeigt sich, dass der Strom den kompletten Weg von einem Fußpunkt zum anderen entlang der Keramik genommen hat. In f) dagegen sind nur die beiden Fußpunkte erkennbar. Bild g) zeigt eine Verfärbung am Tripelpunkt. Diese Übersicht zeigt die am häufigsten vorkommenden Metaldampfspuren. Aber nicht jeder Durchschlag hinterlässt eine gut sichtbare Spur. Einige Prüfkörper zeigten nur geringe Spuren. Es besteht keine exakte Korrelation zwischen Form, Konzentration, Größe und Anzahl oder der Art (Wechsel- oder Stoßspannung) des Durchschlags. Wenn sich bei einer höheren Feldstärke infolge der Exzentrizität die Überschläge häufen, sollte dies jedoch anhand der Metaldampfspuren an der Keramik erkennbar sein. [Pso15]

Beim Vergleich der Messergebnisse der Durchschlagsuntersuchungen mit den Metaldampfspuren zeigt sich, dass kein Zusammenhang zwischen dem Abstand Metaldampfschirm - Keramik und dem Durchschlagsort besteht. Abbildung 6-40 zeigt ein Ergebnis, wie es eigentlich erwartet wird. Die Metaldampfspuren befinden sich im Bereich 166° - 180° . Dort ist der Abstand am geringsten und damit auch die Feldstärke am höchsten. Das Minimum des Abstands befindet sich nicht genau an dieser Stelle, jedoch befand sich dort eine Zentriernoppe, was zu einer weiteren Erhöhung der elektrischen Feldstärke führte.

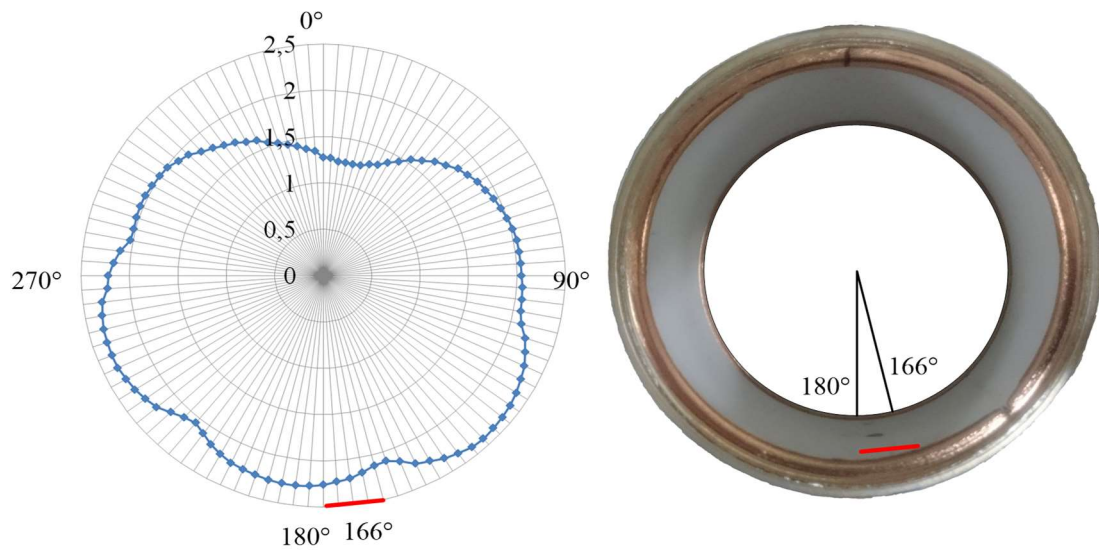


Abbildung 6-40: Messergebnis der Exzentrizitätsmessung mit rot markiertem Bereich, in dem Metaldampfspuren gefunden wurden, sowie Foto der Keramik mit den Metaldampfspuren (Prüfkörpers KLG10N HS-Seite)

Abbildung 6-41 dagegen zeigt ein gegenteiliges Messergebnis. Dort treten die Metaldampfspuren bei 97° auf. Das ist aber die Stelle, an der der Abstand am größten und damit die Feldstärke am niedrigsten ist. Der Prüfkörper wies an dieser Stelle keine geometrischen Besonderheiten auf, die für eine erhöhte makroskopische Feldstärke verantwortlich sein könnten.

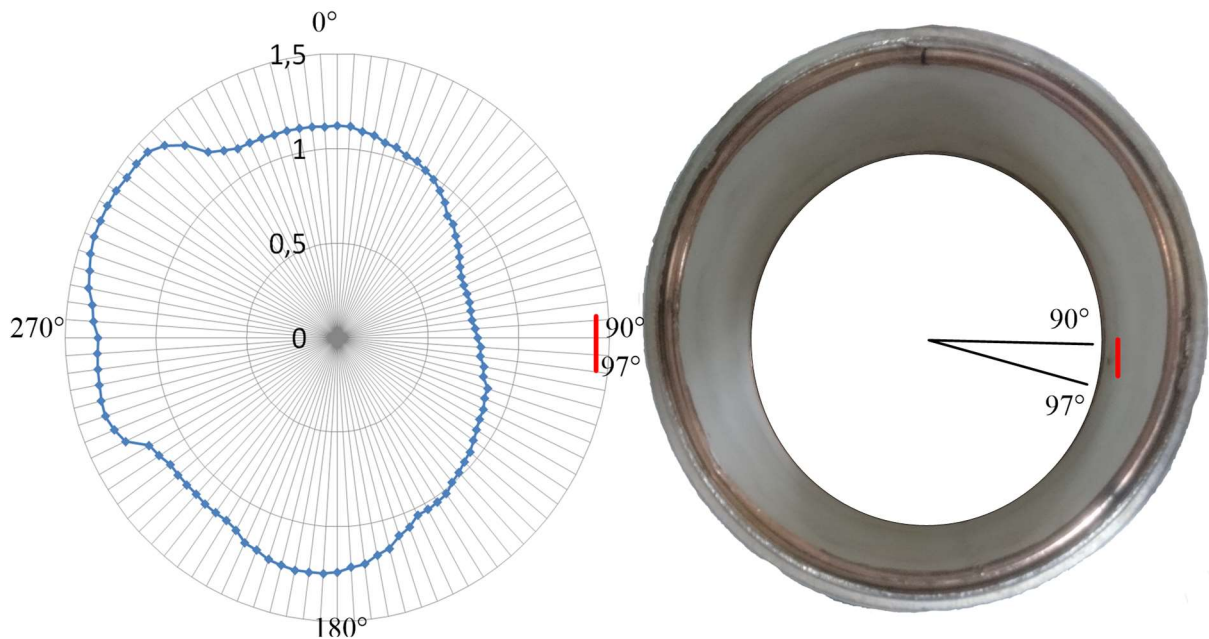


Abbildung 6-41: Messergebnis der Exzentrizitätsmessung mit rot markiertem Bereich, in dem Metallampfspuren gefunden wurden, sowie Foto der Keramik mit den Metallampfspuren (Prüfkörpers KKG3N HS-Seite).

Diese beiden Beispiele sind stellvertretend für die gesamte Messreihe. Das Erscheinen von Metallampfspuren ist unabhängig vom Abstand zwischen Metallampfschirm und Keramik in den hier gemessenen Bereichen.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die vorhandene Felderhöhung aufgrund der Exzentrizität in den hier gemessenen Fällen keine Auswirkungen auf den Entstehungsort von Lichtbögen hat.

Die Messergebnisse zeigen außerdem, dass sich bei vorhandenen Zentriernoppen Metallampfspuren fast ausschließlich an der Keramik gegenüber den Zentriernoppen befinden. Die Simulation hat gezeigt, dass die Feldstärke an der Spitze der Zentriernoppe am höchsten ist. Dadurch wird die Aussage plausibel, dass der Lichtbogen an dieser Stelle entsteht. Gleichzeitig liegen die dort erwarteten Feldstärken in derselben Größenordnung wie an den Stellen mit dem geringsten Abstand der exzentrischen Metallampfschirme. Die Ursache für die Entstehung der Lichtbögen muss also die Oberflächenbeschaffenheit der Zentriernoppen sein. Diese werden aus den Metallampfschirmen gedrückt, was zu einer Aufrauhung der Oberfläche und daraus folgend zu einer Entstehung von Mikroemittern führen kann. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 6-42. Es ist zu erkennen, dass die Oberfläche eine Schleifspur hat. Das führt zu einem scharfkantigen Rand an der rechten Seite.

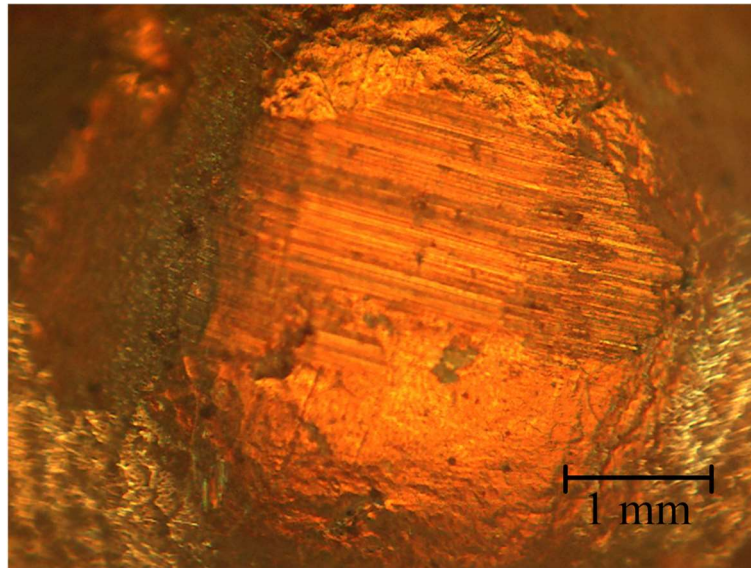


Abbildung 6-42: Mikroskopaufnahme einer Zentriernoppe

Bei einem Großteil aller untersuchten Zentriernoppen waren Spuren einer mechanischen Bearbeitung vorhanden. Dabei muss aber auch beachtet werden, dass der Abstand Zentriernoppenspitze-Keramik (0,5 mm) im Normalfall geringer ist als der Abstand Metalldampfschirm-Keramik im Extremfall (0,7 mm). Zusätzlich konzentriert sich die Stelle mit der höchsten Feldstärke bei den Zentriernoppen auf einen sehr kleinen Punkt, während das Gebiet mit erhöhter Feldstärke ohne Zentriernoppen viel größer ist.

6.3.2 Oberflächenrauheit

Da die Veränderung der makroskopischen Feldstärke die Verteilung der Durchschlagsorte am Metalldampfschirm nicht erklären kann, muss die Ursache in der mikroskopischen Feldstärke liegen. Um zu überprüfen, ob an Stellen mit erhöhter Anzahl von Metalldampfspuren auch vermehrt Mikroemitter vorhanden sind, werden diese untersucht. Schon Sato hat herausgefunden, dass die Oberflächenrauheit einen Einfluss auf das Konditionierungsverhalten hat [Sat03]. Aus diesem Grund wurden die Metalldampfschirme mit einem 3D-Profilometer „Leica DCM 3D“ untersucht². Es wurden sowohl Stellen untersucht, an denen es vermehrt zu Durchschlägen gekommen ist, als auch Stellen, an denen dies nicht der Fall war. Hierbei wurden nicht nur Metalldampfspuren als Indikator herangezogen, sondern auch Lichtbogenspuren auf dem Metalldampfschirm.

² Dank an Herrn Markus König von der Staatlichen Materialprüfanstalt Darmstadt für die Bereitstellung des 3D-Profilometers und die Unterstützung bei der Messung.

Als Kenngröße wird der arithmetische Mittenrauwert R_a benutzt. Dieser gibt den mittleren Abstand eines Messpunkts zur Mittellinie an. Die Mittellinie schneidet innerhalb der Bezugsstrecke das wirkliche Profil so, dass die Summe der Profilabweichungen minimal wird. Dafür wird ein $475\text{ }\mu\text{m}$ breiter und 5 mm langer Streifen vermessen. Durch die Messsoftware wird die Messung automatisch nach DIN EN ISO 4287(2010) ausgewertet und der Mittenrauwert R_a bestimmt [Vol05].

Der Mittenrauwert lag bei allen untersuchten Metaldampfschirmen im Bereich $1,2 - 1,4\text{ }\mu\text{m}$. Dies sind Werte, die typisch für die Herstellung von tiefgezogenen Bauteilen sind [Bla11]. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Stellen, an denen vermehrt Metaldampfspuren, und solchen, an denen keine vorhanden waren. Das Profilometer erzeugt auch vergrößerte Abbildungen der vermessenen Fläche, wie in Abbildung 6-43 dargestellt.

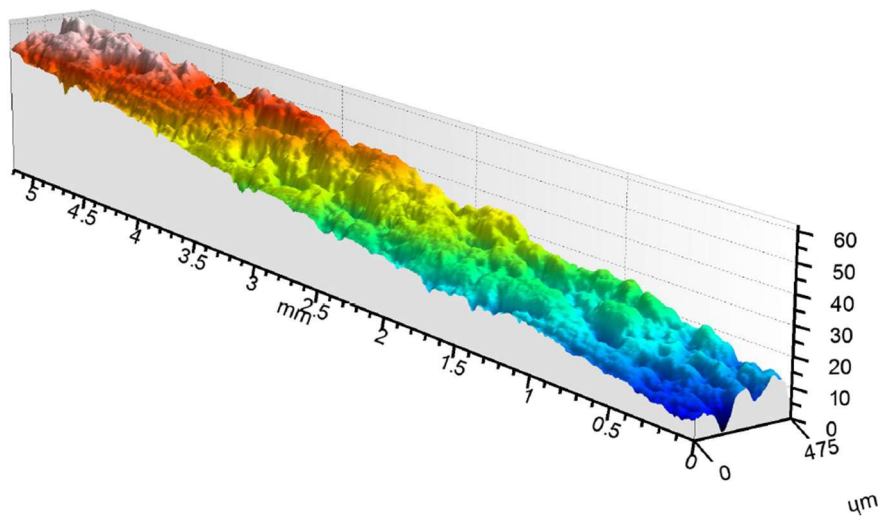


Abbildung 6-43: Vergrößerter Oberflächenausschnitt der Oberflächenmessung

Auch bei einer nachträglichen Betrachtung der vergrößerten Profile zeigten sich keine Unterschiede.

Generell konnte auch hier kein Zusammenhang zwischen vermehrt auftretenden Metaldampfspuren und einer erhöhten Oberflächenrauheit festgestellt werden. Die Mikroskopaufnahme in Abbildung 6-44 zeigt, dass die durch den Durchschlag entstehenden Krater

viel größer und scharfkantiger sind, als die durch den Herstellungsprozess entstandenen Unebenheiten.

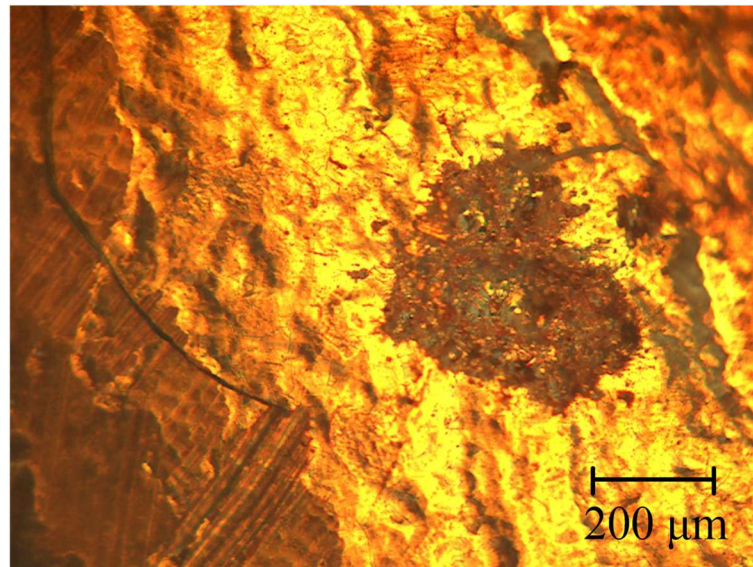


Abbildung 6-44: Mikroskopaufnahme eines Lichtbogenfußpunktes

Das müsste dazu führen, dass sich Durchschläge vermehrt an einer Stelle bilden. Der erste Durchschlag würde an einer zufälligen Stelle stattfinden. Durch die scharfkantigen Aufschmelzungen müssten diese dann die Ursprungsorte für die weiteren Durchschläge sein. Da das aber nicht der Fall ist, kann nur davon ausgegangen werden, dass der Vakuumdurchschlag einer gewissen statistischen Streuung unterworfen ist, deren Ursachen noch nach wie vor unklar sind bzw. andere hier nicht untersuchte Mechanismen, wie Verunreinigungen im Metall, als Ursache haben.

7 FEM-Simulation

Kapitel 6 hat gezeigt, dass bei unterschiedlichen Prüfkörpern auch unterschiedliche Spannungsfestigkeiten erreicht wurden. Damit Aussagen über die Feldverteilung und Feldbeanspruchung bestimmter Bereiche getroffen werden können, wurden die Prüflinge in der FEM-Software COMSOL Multiphysics® nachgebildet. Damit die Feldverteilung innerhalb der Prüfkörper mit der tatsächlichen Feldverteilung während der Prüfung übereinstimmt, mussten die Schirmelektroden auf Hochspannungs- und Erdseite modelliert werden. Die Simulation hat auch gezeigt, dass der restliche Versuchsaufbau (Ölgefäß und Standfuß) keinen Einfluss auf die Feldverteilung haben und deshalb nicht modelliert werden müssen. In der Simulation sind die Prüfkörper von Öl ($\epsilon_r = 2,1$) umgeben. Die Prüfkörper wurden 3-dimensional nach den CAD-Modellen erstellt und dann in Schnittebenen ausgewertet. Da die Zentriernoppen in Realität und im CAD Modell teilweise abweichen wurden für die Simulation die idealen Werte genommen. Der Durchmesser der Noppen beträgt in der Simulation 1,8 mm, die Höhe 0,55 mm. Ein Modell mit einer Schnittebene zur Auswertung ist in Abbildung 7-1 zu sehen.

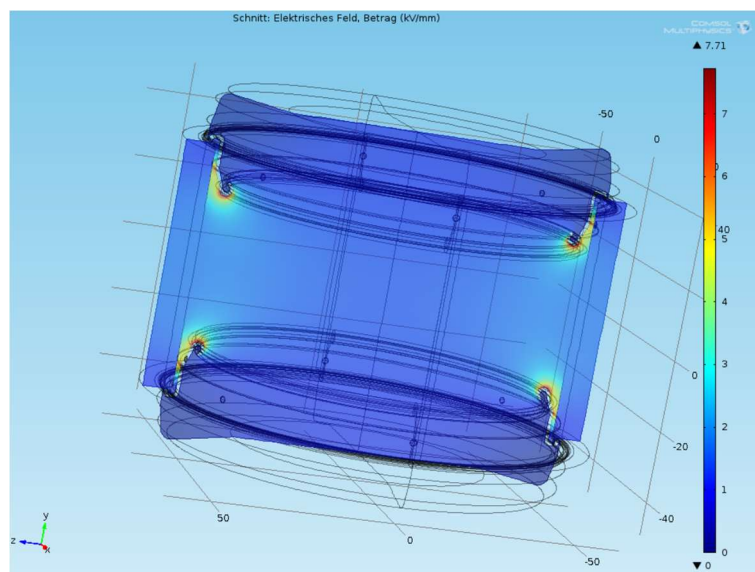


Abbildung 7-1: 3D-FEM-Simulation mit einer Auswertungsebene, anliegende Spannung 407,7 kV; Ausgabe der elektrischen Feldstärke in kV/mm

Ein Vergleich mit einer achsensymmetrischen-2D-Simulation hat gezeigt, dass die Feldstärken, mit Ausnahme der Noppenspitze, mit der 3-dimensionalen Simulation übereinstimmen. Bei der 2D-Simulation würde aus der Noppe durch eine achssymmetrische Rotation eine Schneide, an deren Spitze eine geringere Feldstärke auftreten würde. Durch

den Vergleich der beiden Simulationen konnte ein Faktor bestimmt werden, mit dem man die Feldstärke an der Noppenspitze von der 2D-Simulation in die 3D-Simulation umrechnen kann. Dieser beträgt 1,224. Da die Zeitersparnis beim Berechnen aber enorm ist (3D – 2 Stunden; 2D – 1 Minute), wurden die Untersuchungen an 2D-Modellen durchgeführt. Dieser Faktor ist in den hier vorgestellten Ergebnissen schon mit eingerechnet.

Da für einen Durchschlag im Vakuum die Feldstärke auf der Oberfläche entscheidend ist, wird nicht die komplette Feldverteilung betrachtet, sondern nur die Feldstärke im Bereich der Dampfschirme. Eine Detailansicht dieses Bereichs befindet sich beispielhaft in Abbildung 7-2.

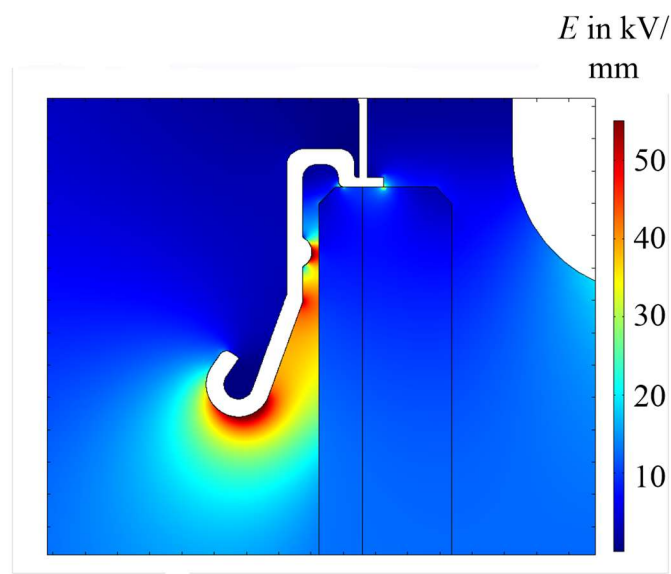


Abbildung 7-2: Detailansicht Metaldampfschirm ($\epsilon_{r,Keramik} = 9$; $\epsilon_{r,\text{Öl}} = 2,1$; $U = 407,7 \text{ kV}$)

Es zeigt sich, dass die maximalen Feldstärken erwartungsgemäß an der Spitze der Zentriernoppe, an der Kröpfung sowie an der Biegung auftreten. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass sich auch Maxima an der Dampfschirmkante außerhalb des Prüfkörpers und am Tripelpunkt befinden. Diese werden hier nicht betrachtet. Da die Feldverteilung außerhalb des Prüfkörpers nicht von Interesse ist, wurde der Einfachheit halber bei der Modellierung an dieser Stelle ein gerader Abschluss mit scharfer Kante erstellt. Bei den Messreihen hat sich gezeigt, dass der innere Tripelpunktbereich eine Stelle ist, an der es auch zu Überschlägen kommen kann. Diese Stelle ist aber extrem schwierig nachzubilden. Durch die sehr kleinen Abmessungen bewirken kleine Änderungen der Geometrie schon große Änderungen in der Feldstärke. Dies ist jedoch gegeben durch die

dünne Metallisierung auf der Keramik und die ungleichmäßige Form des erstarrten Lots. Da aus diesen Gründen keine exakte Angabe der Feldstärke in diesem Bereich möglich ist, kann dieser Bereich nicht in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Um die tatsächlich auftretende maximale Feldstärke zu erhalten, wurde die Simulation mit maximal erreichbarer Durchschlagsspannung U_A durchgeführt (Tabelle 6.1). Die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 7.1.

Tabelle 7.1: Maximale Feldstärken an den Metaldampfschirmen bei anliegenden Spannungen U_A

Modell	Hochspannungsseite			Erdseite		
	E_{\max} an Zentrier- noppen in kV/mm	E_{\max} an Kröpf- fung in kV/mm	E_{\max} an Bie- gung in kV/mm	E_{\max} an Zentrier- noppen in kV/mm	E_{\max} an Kröpf- fung in kV/mm	E_{\max} an Bie- gung in kV/mm
KKGXN 70 mm	38,4	28,9	31,8	38,4	28,9	31,8
KKGXO 70 mm		33,9	36,4		33,9	36,4
KKOXN 70 mm	37,6		26,5	37,6		26,5
KKOXO 70 mm			33,6			33,6
KLGXN 70 mm	46,1	35,4	45,4	11,1		58,3
KLGXO 70 mm		45,7	57,2			73,4
KLOXN 70 mm	38,3		35,1	9		51,8
KLOXO 70 mm			42,6			61,4
KKOXO 45 mm			37			37

Die maximalen Feldstärken bei den Prüfkörpern mit großer Schlagweite liegen im Bereich 33 – 38 kV/mm. In diesem Bereich liegt auch die Prüfkörpergeometrie mit der 45-mm-Keramik. Bei dem Prüfkörper mit der geringen Schlagweite und 70-mm-Keramik hingegen herrscht eine viel größere Feldstärke. Das Maximum liegt bei der Biegung an der Erdseite im Bereich 51 – 73 kV/mm. Dieser Wert erscheint ziemlich hoch. Auch eine überschlagsmäßige Berechnung der Feldstärke führt zu dem Ergebnis, dass die Durchbruchfeldstärke bei den Prüfkörpern mit geringerem Abstand viel höher ist. Die Ursache

dafür muss im Tripelpunktbereich liegen. Würde der Durchschlag von den Metaldampfschirmen nach den klassischen Durchschlagsmechanismen (Durchschlag sobald E_{krit} erreicht wurde) ablaufen, müsste er bei den gleichen Feldstärken auftreten.

Entsteht der Durchschlag durch Feldemission, würde er bei den Prüfkörpern mit 70-mm-Keramik und geringer Schlagweite auch bei kleinen Feldstärken auftreten. Da die Schirme in den Prüfkörpern die gleiche Oberflächengüte haben, müsste es auch bei den gleichen makroskopischen Feldstärken zur Feldemission kommen.

Entsteht der Durchschlag durch Partikel, würde das die Durchschläge bei hohen Feldstärken erklären. Die Entstehung eines Partikeldurchschlags ist abhängig von der erreichten Geschwindigkeit des Partikels, und diese ist proportional zum anliegenden Feld. Bei den geringeren Feldstärken wäre die Partikelgeschwindigkeit auch gering und würde auch nicht mehr zu einem Durchschlag führen.

Der Durchschlag muss deswegen von einem Punkt (Tripelpunkt) ausgehen, bevor die kritische Feldstärke an der Elektrodenoberfläche erreicht wird. Durch den unsymmetrischen Aufbau der Prüfkörper mit langem und kurzem Metaldampfschirm wird ein Tripelpunkt viel besser dielektrisch abgeschirmt. Ein weiteres Indiz dafür ist, dass bei den Prüfkörpern mit der 45-mm-Keramik dieselbe Schlagweite vorhanden ist wie bei den Prüfkörpern mit einem langen und kurzen Metaldampfschirm, hier aber die maximale Feldstärke nur bei 37 kV/mm liegt.

Ein Vergleich der der simulierten Ergebnisse mit den ermittelten Durchschlagsspannungen muss aber mit Vorsicht genossen werden. Die hier ermittelten Feldstärken sind nur makroskopische Feldstärken. Bei realen Durchschlagsversuchen ist aber die Feldstärke entscheidend, die sich aus dem makroskopischen und mikroskopischen Anteil zusammensetzt (siehe Kap. 2.1.1.). Da der β -Faktor aber im Bereich 10 – 1000 [Sla08] liegen kann, kann man hier keine genauen Feldstärken angeben.

8 Diskussion der Ergebnisse

Die Grundvoraussetzung für die Optimierung des Konditionierungsvorgangs ist, dass der Konditionierungsvorgang mit verschiedenen Spannungsimpulsen durchgeführt werden kann, die anschließende dielektrische Festigkeit aber davon unabhängig ist. In Kapitel 6.1 wurde das gezeigt. Die Prüfkörper wurden mit unterschiedlichen Impulsen konditioniert, und danach wurde die dielektrische Festigkeit mit verschiedenen Stoßspannungsformen bestimmt. Es konnte kein Einfluss des Konditionierungsimpulses auf das Ergebnis der dielektrischen Prüfung festgestellt werden. Es hat sich gezeigt, dass das Prüfverfahren, wie es in den einschlägigen Normen definiert ist, nicht einfach auf Vakuum-Isolierstrecken angewendet werden kann. Kommt es zu einem Durchschlag, verändert sich die dielektrische Festigkeit. Daraus folgt, dass ein U_{d50} -Wert nicht angegeben werden kann, und dass Stehspannungsprüfungen, bei denen eine gewisse Anzahl von Durchschlägen erlaubt sind, nicht angewendet werden können. Die einzig sinnvolle statistische Größe zur Charakterisierung der elektrischen Festigkeit bei Vakuumdurchschlagsstrecken ist somit der U_{d0} -Wert, also derjenige mit einer Durchschlagswahrscheinlichkeit von Null.

Beim Konditionieren mit verschiedenen Kreisparametern des Stoßspannungskreises hat sich gezeigt, dass der Konditionierungsvorgang stark davon abhängt, welche Kreiselemente vorhanden sind. Durch eine Veränderung des Strombegrenzungswiderstands ändert sich nicht nur der Strom während des Durchschlags, sondern auch die Impulsform. Bei einem Strombegrenzungswiderstand von $860\ \Omega$ ist in dem verwendeten Prüfkreis die Stoßspannungsform die Normblitzstoßspannung (1,2/50), und die Konditionierungsverläufe weisen einen sehr hohen Anteil von stark dekonditionierenden Durchschlägen auf. Die mit dieser Kreiskonfiguration ermittelten Werte besitzen keine Aussagekraft. Grund dafür ist die durch die dekonditionierenden Durchschläge hervorgerufene Streuung. Es ist dadurch nicht möglich, eine Aussage zu treffen, wie hoch die wirkliche dielektrische Festigkeit nach der Konditionierung ist. Auch durch eine sehr hohe Anzahl von vermessenen Prüfkörpern kann aufgrund der Streuung kein Wert für die dielektrische Festigkeit einer bestimmten Dampfschirmgeometrie gegeben werden, da die Durchschlagsspannungen in den vorliegenden Fällen zwischen 220kV und 420 kV verteilt waren. Dafür ist mit dieser Konditionierungskreisconfiguration die höchste Stehspannung (U_{d0}) erreicht wor-

den, welche als oberes Limit angesehen werden kann. Auch die im Mittel erreichte Spannungsfestigkeitssteigerung U_R war in dieser Konfiguration am größten. Bei einer Vergrößerung des Strombegrenzungswiderstands auf $18,3 \text{ k}\Omega$ erhöhte sich die Impulslänge und erreichte eine Stirnzeit von $16 \mu\text{s}$ und eine Rückenhalbwertszeit von $80 \mu\text{s}$. Die Messwerte aus dieser Konfiguration enthalten weniger stark dekonditionierende Durchschläge und auch eine geringere Streuung. Die hier erreichten Spannungsfestigkeitssteigerungen sind geringer, dafür aber über mehrere Prüfkörper konstant. Unter der Annahme, dass sich der Konditionierungsverlauf mit der Anzahl der Durchschläge nicht ändert, ist es möglich den Verlauf bis zur maximalen Durchbruchspannung zu extrapolieren. So kann die Anzahl der benötigten Durchschläge ermittelt werden. Um die Anzahl zu bestimmen, werden die Konditionierungsverläufe der durchgeführten Messungen gemittelt. Bei der Berechnung der Mittelwerte wird nur unterschieden zwischen der Polarität und der Schlagweite. Die große Schlagweite wird mit KK abgekürzt, da die Prüfkörper zwei kurze Metalldampfschirme enthalten. Kleine Schlagweiten werden mit KL bezeichnet, da sie einen kurzen und einen langen Metalldampfschirm enthalten. Die Polarität der Spannung wird durch ein + oder – angegeben. Die Verläufe sind in Abbildung 8-1 dargestellt.

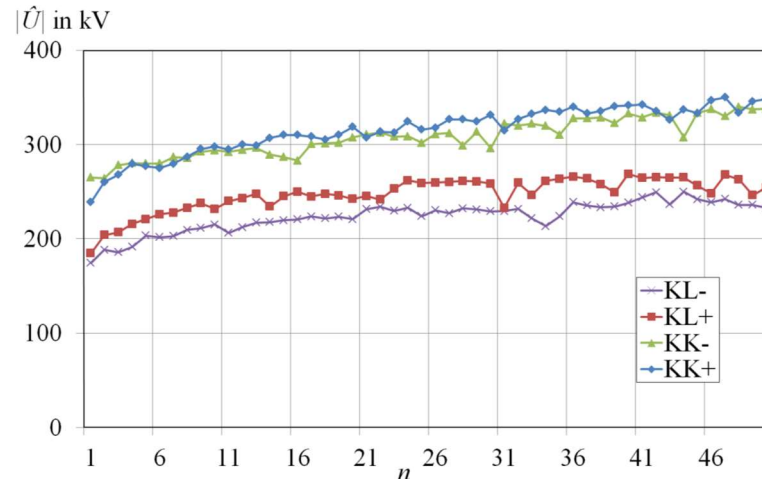


Abbildung 8-1: Gemittelte Konditionierungsverläufe der Messungen mit 16/80-Stoßspannung

Anhand dieser Abbildung erkennt man auch die Polaritätsabhängigkeit des Vakuumdurchschlags. Wie schon in Kapitel 2.1.3 beschrieben, ist der Durchschlag aufgrund der Schlagweite hauptsächlich anodeninitiiert. Neben dem anodeninitiierten Durchschlag werden zu einem kleinen Teil auch kathodeninitiierte Durchschläge stattfinden. Da als

erstes mit negativer Polarität geprüft wurde, wurden dabei hauptsächlich die Emitter auf der Anode entfernt, aber auch einige wenige Emitter auf der Kathode, die schon bei kleineren Feldstärken Elektronen emittiert haben. Diese waren dann bei der Prüfung mit positiver Polarität nicht mehr vorhanden, wodurch es im Mittel zu einer höheren Durchschlagsfestigkeit gekommen ist. Ein weiterer Grund für die Polaritätsabhängigkeit können auch partikelinitiierte Durchschläge sein (Kapitel 2.1.5). Die Partikel führen bei der zuerst stattfindenden Konditionierung mit negativer Polarität zu einem Durchschlag und sind dadurch bei der Konditionierung mit positiver Polarität nicht mehr vorhanden.

Aus den in Abbildung 8-1 gezeigten Konditionierungsverläufen kann mithilfe des Computers eine Regressionsanalyse durchgeführt werden, um die Konditionierungsverläufe als Gleichungen darzustellen. Je nach Ansatz (lineare Regression, potentielle Regression und exponentielle Regression) entstehen verschiedene Extrapolationen der Verläufe und damit auch eine unterschiedliche Anzahl von Durchschlägen. Abbildung 8-2 zeigt die verschiedenen Regressionsverläufe an dem Beispiel KK+.

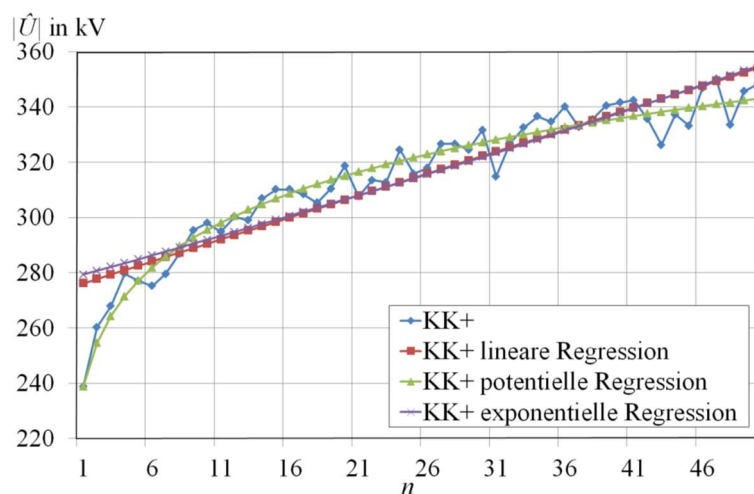


Abbildung 8-2: Verschiedene Regressionsverläufe von KK+

Die den Verläufen zugrunde liegenden Regressionsgleichungen können Tabelle 8.1 entnommen werden.

Tabelle 8.1: Vergleich der Regressionsgleichungen am Beispiel des Verlaufs KK+

Regressions- art	Regressionsgleichung
Linear	$f(x) = 274,55 + 1,59x$
Potentiell	$f(x) = 238,75x^{0,0926}$
Exponentiell	$f(x) = 278,02e^{4,88 \cdot 10^{-3}x}$

Beim Vergleich der Regressionsverläufe wird deutlich, dass die potentielle Regression den Konditionierungsverlauf am besten nachbildet. Aus diesem Grund wird die potentielle Regression im weiteren Verlauf angewendet. Da diese Art der Regression auch zu einer sehr hohen theoretischen Anzahl von Durchschlägen bei hohen Spannungen führt, liegt die tatsächliche Anzahl wahrscheinlich darunter. Am Ende des Konditionierungsverlaufes ist die Erhöhung der Spannungsfestigkeit nur minimal. Bei der Konditionierung erfolgt die Steigerung der Spannung aber mit festgelegten Spannungsstufen, sodass man mit einer Erhöhung der Spannungsstufe schon mehrere theoretische Durchschläge aus der Regressionsanalyse „überspringt“. In Tabelle 8.2 ist die Anzahl der benötigten Durchschläge n_{U_A} um auf die maximale Durchschlagspannungen U_A zu kommen, für alle in Abbildung 8-1 gezeigten Verläufe eingetragen.

Tabelle 8.2: Benötigte Anzahl von Durchschlägen bis zum Erreichen bestimmter Durchschlagspannungen mit 16/80-Stoßspannungen

Ver- lauf	Regressionsglei- chung	$n_{312,8}$	$n_{394,4}$	$n_{276,8}$	$n_{331,5}$
KL-	$f(x) = 175,06x^{0,0818}$	1207	20529	271	2455
KL+	$f(x) = 195,47x^{0,0786}$	397	7562	84	829
Ver- lauf	Regressionsglei- chung	$n_{407,7}$	$n_{466,7}$	$n_{365,3}$	$n_{457,4}$
KK-	$f(x) = 249,16x^{0,0708}$	1049	7075	223	5324
KK+	$f(x) = 238,75x^{0,0926}$	324	1392	99	1120

Obwohl es den Anschein hat, dass die Konditionierung mit 16/80- und 30/115-Stoßspannungen nicht zu einer Spannungsfestigkeit von einer 1,2/50-Stoßspannungskonditionierung führt, ist dies doch möglich. Die Regressionsgleichungen zeigen, dass auch bei einer scheinbaren Sättigung des Konditionierungsverlaufes noch immer eine Steigung vorhanden ist, die aber sehr klein ist, was auch zu der hohen Anzahl von erwarteten Durchschlägen führt. Physikalisch lässt sich das folgendermaßen erklären: Die maximale Spannungsfestigkeit einer Vakuumstrecke ist erreicht, wenn alle Emitter und Partikel von der

Oberfläche entfernt sind. Bei der Konditionierung mit Normblitzstoßspannung ist der Durchschlag durch die hohe Ladungsmenge sehr energiereich. Dadurch wird der Emitter mit einem Durchschlag sofort entfernt, bzw. mehrere Emitter/Partikel, die nah beieinander liegen. Durch den hohen Energiegehalt kommt es beim Großteil der Durchschläge aber zu einer nichtgewollten Erzeugung von neuen Emittoren (Dekonditionierung), da der Durchschlag viel mehr Energie einbringt, als unbedingt nötig ist um nur den Emitter zu entfernen. Bei Durchschlägen mit einem geringeren Energiegehalt, wie es bei der Konditionierung mit 16/80- und 30/115-Stoßspannung der Fall ist, benötigt man mehrere Durchschläge um einen Emitter zu entfernen, wodurch die Gesamtanzahl der Durchschläge stark ansteigt. Rein theoretisch besteht aber die Möglichkeit, dass man mit energieärmeren Konditionierungsimpulsen die gleiche Spannungsfestigkeit wie mit energiereichen Impulsen erreichen kann. Dafür wäre gegebenenfalls eine Anpassung der Ladungsmenge nötig, falls die eingestellte Ladungsmenge nicht mehr ausreicht, um die Emitter zu entfernen.

Die in Tabelle 8.2 extrapolierten Werte für die erwartete Anzahl von Durchschlägen sind teilweise sehr hoch und bei realen Messungen wahrscheinlich geringer. Sie werden jedoch ein Vielfaches der Anzahl der benötigten Durchschläge mit Normblitzstoßspannung betragen. Hierbei zeigt sich auch der Vorteil der Konditionierung mit längeren Impulsen: Eine Regressionsanalyse der Konditionierungsverläufe mit Normblitzstoßspannung wäre nicht möglich.

Eine weitere Erhöhung des Strombegrenzungswiderstands auf 50 k Ω führt zu einer weiteren Verlängerung der Stoßspannungsform. Dadurch erhöht sich in den hier durchgeführten Untersuchungen die Stirnzeit auf 30 μ s und die Rückenhalbwertszeit auf 115 μ s. Im Gegensatz zu dem Rückgang der Spannungsfestigkeitssteigerung beim Vergrößern der Impulslänge von 1,2/50-Stoßspannungen auf 16/80-Stoßspannungen stieg diese hier wieder leicht an (Ausnahme KL-). Der absolute Konditionierungsgrad $\overline{\eta}_A$ ist bei 16/80-Stoßspannungen trotzdem minimal höher als bei 30/115-Stoßspannungen. Der Dekonditionierungsgrad $\overline{\eta}_D$ ist mit steigender Impulslänge gefallen (auch hier ist die Ausnahme KL-). Die Anzahl der benötigten Durchschläge n_{U_A} , um auf die maximale Durchschlagsspannungen U_A mit 30/115-Stoßspannungen zu kommen, findet sich in Tabelle 8.3.

Tabelle 8.3: Benötigte Anzahl von Durchschlägen bis zum Erreichen bestimmter Durchschlagsspannungen mit 30/115-Stoßspannung

Ver- lauf	Regressionsglei- chung	<i>n</i> _{312,8}	<i>n</i> _{394,4}	<i>n</i> _{276,8}	<i>n</i> _{331,5}
KL-	$f(x) = 172,58x^{0,0871}$	924	13216	227	1799
KL+	$f(x) = 185,83x^{0,0897}$	333	4401	85	635
Ver- lauf	Regressionsglei- chung	<i>n</i> _{407,7}	<i>n</i> _{466,7}	<i>n</i> _{365,3}	<i>n</i> _{457,4}
KK-	$f(x) = 271,5x^{0,0553}$	1560	17964	215	12482
KK+	$f(x) = 236,59x^{0,095}$	308	1276	97	1033

Hier sinkt die Zahl (bis auf KL-) der Durchschläge bis zum Erreichen der maximalen Durchschlagsspannungen U_A im Gegensatz zur Messung mit 16/80-Stoßspannungen.

Tendenziell hat sich gezeigt, dass ein höherer Strombegrenzungswiderstand besser für den Konditionierungsverlauf ist. Da die Veränderung der Werte aber nicht konstant ist, kann nicht 100%ig sicher gesagt werden, dass ein immer größerer Strombegrenzungswiderstand zu einem immer besseren Konditionierungsverlauf führt. Die Umstellung von Normblitzstoßspannung auf 16/80-Stoßspannung hat eine große Veränderung gebracht. Hier lag der Faktor, um den der Strombegrenzungswiderstand erhöht wurde, bei 22. Bei der Umstellung von der 16/80-Stoßspannung zur 30/115-Stoßspannung lag der Faktor nur noch bei ca. drei. Neben dem abweichendem Verhalten von KL- war die Anzahl der Messreihen auch nicht konstant. Auch durch die hier noch relativ große Streuung führen statistische Tests (t-test) zu keinen brauchbaren Ergebnissen. Über weitere Untersuchungen müsste geklärt werden, ob eine weitere Erhöhung des Strombegrenzungswiderstands das Konditionierungsverhalten wirklich verbessert.

Durch die Verwendung von längeren Konditionierungsstoßspannungen konnte das Konditionierungsverhalten merklich verbessert werden. Die Anzahl der Durchschläge steigt jedoch stark an, damit eine gleich hohe Spannungsfestigkeit erreicht werden kann. In einer weiterführenden Arbeit müsste überprüft werden, ob eine Konditionierung mit hoher Durchschlagsanzahl und entsprechender Impulslänge auch wirklich zu der gewünschten Spannungsfestigkeit führt. Die in dieser Arbeit untersuchten maximalen Durchschlagsspannungen sind nur vereinzelt aufgetreten und könnten bei einer anderen Anzahl von Prüfkörpern andere Werte haben.

Anhand der Versuche mit einer parallelen Kapazität konnte gezeigt werden, dass sich diese negativ auf das Konditionierungsverhalten auswirkt. Durch den Stoßgenerator wird die Parallelkapazität aufgeladen. Wenn es zum Durchschlag kam, entlädt sich nicht nur der Stoßgenerator über die Vakuumdurchschlagstrecke, sondern zusätzlich die Parallelkapazität. Durch die erhöhte Menge an Ladung (im Mittel $226 \mu\text{C}$) wurde die Elektrodenoberfläche so stark beschädigt, dass eine Konditionierung nicht möglich war. Die in dieser Konfiguration erreichte Ladungsmenge war dennoch nicht in dem Bereich der Ladungsmenge mit Normblitzstoßspannung. Beim Vergleich der verschiedenen Stromverläufe in Abbildung 8-3 zeigt sich, dass sich der Stromverlauf von den anderen Kreiskonfigurationen unterscheidet.

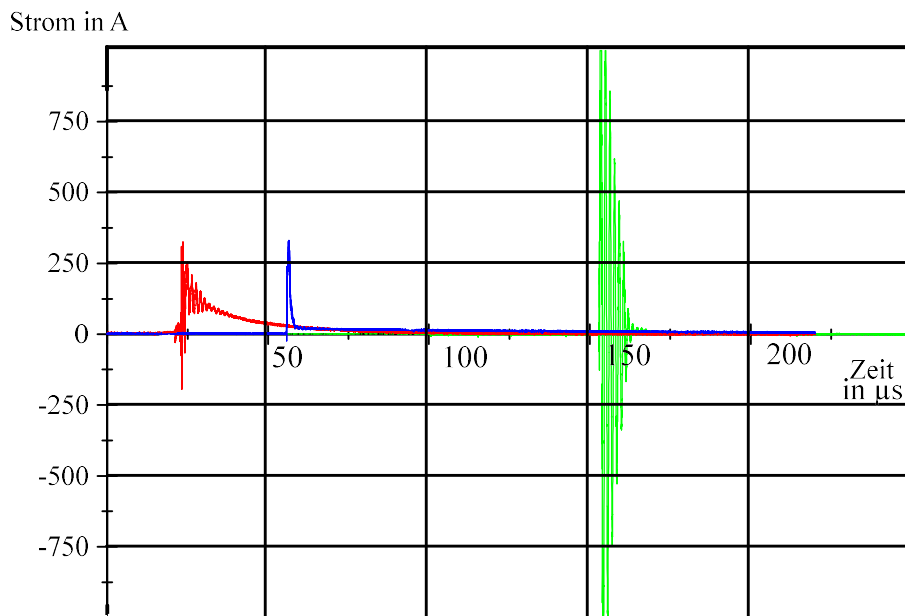


Abbildung 8-3: Stromverläufe beim Durchschlag mit Normblitzstoßspannung (rot), 16/80-Stoßspannung (blau) und 34/125-Stoßspannung ($18,3 \text{ k}\Omega$ und $1,13 \text{ nF}$ Parallelkapazität; in grün)

Am Stromverlauf der 16/80-Stoßspannung (blau) sind die zwei Komponenten des Durchschlagstroms gut zu erkennen. Die erste Komponente ist der hohe schmale Peak, hervorgerufen durch die Kapazitäten, die parallel zum Prüfkörper geschaltet sind. Die zweite Komponente folgt direkt darauf und hat eine geringere Amplitude bei einer längeren Dauer. Diese Komponente ist abhängig vom Strombegrenzungswiderstand. Bei Normblitzstoßspannung (rot) wird deutlich, dass der Übergang fließend ist. Beim Stromverlauf des Durchschlags mit angeschlossener Parallelkapazität (grün) zeigt sich, dass die erste

Komponente eine viel größere Amplitude hat und breiter ist. Die zweite Komponente ist bei diesen Durchschlägen nicht vorhanden. Durch die auftretende Oszillation kommt es im Stromnulldurchgang zum Verlöschen des Lichtbogens. Sehr häufig kommt es dabei auch zu multiplen Durchschlägen während eines Impulses, bei dem der Strom direkt nach der ersten Komponente verlöscht.

Die Analyse des Stroms führt auch zu der Erkenntnis, dass nicht die Stromamplitude entscheidet, ob der Durchschlag konditionierend oder dekonditionierend ist. Die ausschlaggebende Größe ist die Ladung, die bei einem Durchschlag durch den Lichtbogen transportiert wird. Bei den Stromverläufen der 16/80-Stoßspannung wird deutlich, dass bei konditionierenden Durchschlägen die zweite Komponente des Stroms immer fehlte, was sich in einem Rückgang der Ladungsmenge um 1 - 0,8 mC bemerkbar machte. Auch die Ergebnisse der Messung mit angeschlossener Parallelkapazität lassen darauf schließen. Rein rechnerisch ergibt sich bei einer durchschnittlichen Spannung von 200 kV und einer Kapazität von 1,13 nF eine zusätzliche Ladung von 0,23 mC. Dieser Wert würde die Dekonditionierung nicht erklären. Beim genauen Betrachten des Stromverlaufs zeigt sich, dass der Strom um den Nulldurchgang oszilliert. Beim Aufsummieren der darin enthaltenen Ladungsmenge wird der Bereich > 1 mC wieder erreicht. Das bedeutet, dass hochfrequente stromstarke Durchschläge, die in einigen Arbeiten in der Literatur untersucht wurden, unter bestimmten Umständen nicht zum Konditionieren geeignet sind.

Diese Ergebnisse haben nicht nur Auswirkungen auf den eigentlichen Konditionierungsprozess, sondern auch auf die dielektrische Prüfung von Vakuumschaltrohren. Wenn es bei einer Prüfung mit Normblitzstoßspannung zu einem Durchschlag kommt, ist es sehr wahrscheinlich, dass die darauffolgenden Stoßspannungsbeanspruchungen ebenfalls zum Durchschlag führen werden. Die Stehstoßspannungsprüfungen müssten so durchgeführt werden, dass kein Durchschlag erlaubt ist, oder dass mit einer von der Form 1,2/50 abweichenden Stoßspannungsform geprüft werden darf. Auch die Angabe einer 50 %-Durchschlagsspannung (U_{d50}) ist bei Vakuumdurchschlagstrecken nicht möglich, da jeder Durchschlag die Oberfläche verändert und damit auch die Spannungsfestigkeit.

Die mit dem optimierten Konditionierungskreis gefundenen Ergebnisse weisen noch eine erhebliche Streuung auf. Aufgrund dessen wurden die Prüfkörper hinsichtlich der Ursprungsorte der Lichtbögen untersucht. Dabei wurde von der Vermutung ausgegangen,

dass herstellungsbedingte Toleranzen den Ursprungsort der Lichtbögen beeinflussen. Hier hat sich gezeigt, dass die Toleranzen zu gering waren, um den Entstehungsort zu beeinflussen. Das Vorhandensein von Zentriernoppen hat hingegen einen sehr großen Einfluss auf die Verteilung der Durchschlagsorte. Die Ursache dafür liegt vor allem an der Oberflächenbeschaffenheit der Noppenspitze. Diese zeigte bei allen Prüfkörpern neben den Durchschlagspuren auch Spuren durch mechanische Bearbeitung. Durch eine FEM-Simulation konnte gezeigt werden, dass durch die geometrische Form der Noppen und den geringen Abstand zur Keramik an der Noppenspitze zusätzlich zu der erhöhten mikroskopischen Feldstärke auch eine stark erhöhte makroskopische Feldstärke hinzukommt.

Durch die zusätzliche Charakterisierung der Prüfkörper anhand von FEM-Simulationen hat sich gezeigt, dass die mittlere Durchbruchfeldstärke bei den Prüfkörpern mit kurzem Metaldampfschirm viel geringer ist als bei den Prüfkörpern, die einen langen Metaldampfschirm aufwiesen. Dieses Verhalten weist daraufhin, dass die Tripelpunkte maßgeblich die dielektrische Festigkeit beeinflussen. Prüfkörper völlig ohne Metaldampfschirm zeigten ein sehr schlechtes dielektrisches Verhalten. Die genaue Bestimmung der Feldstärke am Tripelpunkt ist allerdings nicht möglich. Die Umgebungsfeldstärke ist viel geringer, wenn der Tripelpunkt durch einen langen Metaldampfschirm abgeschirmt ist. Die Vergleichsmessung der Prüfkörper mit kurzen Keramiken lieferte weitere Hinweise darauf, dass der Tripelpunkt für die geringe Spannungsfestigkeit verantwortlich ist. Trotz gleicher Schlagweite liegt die Durchbruchfeldstärke der Prüfkörper mit ungeschirmten Tripelpunkten nur bei der Hälfte. Beim Design von Vakuumschaltgeräten für höhere Spannungen sollte das beachtet werden. Die Anwendung der hier nicht geeigneten Faustregel „größere Schlagweite = größere Spannungsfestigkeit“ kann dazu führen, dass die erreichte Spannungsfestigkeit letztlich doch geringer wird. Durch die erhöhte Schlagweite der Kontakte und die gleichbleibende Isolatorlänge führt das automatisch zu einer höheren Feldbelastung der Tripelpunkte.

Die genaue Anzahl der Durchschläge, die ihren Ursprung am Tripelpunkt haben und diejenige, die ihren Ursprung am Rand des Schirms haben, ist aber unklar. Es müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, die genau diesen Sachverhalt klären.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit ermittelten Erkenntnisse zeigen, dass der Sprung von der Mittelspannungs- auf die Hochspannungsebene in der Vakuumschalttechnik nicht trivial ist. Eine Vorgehensweise wie bei der Entwicklung von Schaltgeräten mit Gas als Isoliermedium ist hier nicht anwendbar. Die Optimierung von Geometrien durch eine optimierte Feldverteilung reduziert zwar die Feldstärke an kritischen Stellen, aber durch andere Phänomene führt dies nicht zu einer höheren Spannungsfestigkeit.

Die ursprüngliche Aufgabe, die Spannungsfestigkeit von Metaldampfschirmen an Hochspannungsvakuumschaltröhren mit einer optimierten Geometrie und optimiertem Material zu erhöhen, war nicht lösbar. Schon zu Beginn der Messungen hat sich gezeigt, dass sich durch den Konditionierungsvorgang unterschiedliche Spannungsfestigkeiten bei gleichen Geometrien einstellten. Die Streuung war so groß, dass der Effekt durch die veränderten Geometrien und Feldstärken nicht messbar war. Durch eine Veränderung des Konditionierungsimpulses war es möglich, die Streuung zu minimieren.

Über eine Veränderung der Konditionierungskreisparameter wurde die Stoßspannungsform verändert. Beim genaueren Betrachten der Konditionierungsimpulse hat sich gezeigt, dass sich mit der Änderung der Stoßspannungsform auch der Strom und die Ladung bei einem Durchschlag verändern. Die Messungen haben gezeigt, dass die Ladungsmenge, die bei einem Durchschlag transportiert wird, maßgeblich dafür verantwortlich ist, ob ein Durchschlag konditionierend oder dekonditionierend ist.

Durch dieses Ergebnis konnten die bisherigen Erkenntnisse in einem neuem Licht betrachtet werden. Die allgemein vorherrschende Meinung, dass ein größerer Strom zu einer stärkeren Dekonditionierung führt, konnte widerlegt werden. So war es möglich, einen besseren Konditionierungsvorgang mit einer Stoßspannung zu erzeugen, bei dem die Stromamplitude größer war, die transportierte Ladungsmenge aber geringer. Eine generelle Aussage über die optimale Stromhöhe und Ladungsmenge kann nicht gegeben werden, da diese Werte von Parametern abhängig sind, die bei jeder Messung individuell sind. In der Prüfkonfiguration dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass Ladungsmengen kleiner 0,5 mC konditionierend sind, während Ladungsmengen, die größer als 0,5 mC sind, dekonditionierend wirken. Bei Messungen mit anderen Prüfobjekten kann sich dieser Wert aber ändern. Da der Konditionierungsvorgang größtenteils von der Elektrodenoberfläche

abhängt, werden andere Materialien den Grenzwert ändern. Durch die verschiedenen Schmelzpunkte und Wärmeleitfähigkeiten kommt es zu unterschiedlichen Werten für einen Energieeintrag, der nötig ist, um eine Mikrospitze zu schmelzen. Auch andere Oberflächenbehandlungen würden zu anderen Grenzwerten führen, da sich je nach Oberflächenbehandlung die Form und die Anzahl von Mikrospitzen verändert.

Das zeigt, dass der Konditionierungsvorgang unabhängig von dem verwendeten Prüfaufbau ist. Durch verschiedene Kreisparameter (Stoßgeneratoren Prüfling, Streukapazitäten, angeschlossene Teiler, ...) ergeben sich unterschiedliche Strombegrenzungswiderstände und Stoßspannungsformen, die für jedes Labor und jeden Aufbau variieren. Die grundlegende Ladungsmenge, die beim Durchschlag fließt und entscheidend dafür ist, ob der Durchschlag konditionierend oder dekonditionierend ist, ist aber unabhängig davon, da diese durch zusätzliche elektrische Bauteile eingestellt werden kann.

Durch diesen optimierten Konditionierungsvorgang verlängert sich zwar die Zeit, die benötigt wird, um den Prüfling auf eine entsprechende Spannungsfestigkeit zu konditionieren, dafür kann aber sichergestellt werden, dass die erreichte Spannungsfestigkeit verlässlich ist. Durch die verringerte Streuung ist es nun auch möglich, mathematische Modelle zu benutzen, mit denen die Verläufe verglichen werden können, oder mit denen die maximale Spannungsfestigkeit schon während des Konditionierungsvorgangs bestimmt werden kann.

Es muss aber immer im Hinterkopf behalten werden, dass es bei einem Durchschlag, der nicht durch den Konditionierungskreis erfolgt (bei dielektrischen Prüfungen, Fehlern im Netz, ...) zu einer starken Verringerung der Spannungsfestigkeit kommen kann. Aus diesem Grund sollte bei der Entwicklung neuer Hochspannungsvakuumerschaltgeräten sehr konservativ dimensioniert werden, da jeder Durchschlag die gesamte Qualität des Betriebsmittels verringern kann.

Ein Ziel dieser Arbeit war es, den eigentlichen Konditionierungsverlauf zu untersuchen und zu optimieren. Die maximale Spannungsfestigkeit mit dem optimierten Konditionierungskreis wurde an dieser Stelle nicht messtechnisch ermittelt. In weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet sollte überprüft werden, ob die durch die Regressionsanalyse ermittelte

Anzahl von Durchschlägen mit der Realität übereinstimmt und wie sich deconditionierende Durchschläge bei der hohen Anzahl von Durchschlägen mit erhöhter Spannung verhalten.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der Konditionierung mit Stoßspannungen. Eine reine Konditionierung mit Stoßspannungen wäre für die Entwicklung von neuen Hochspannungsvakuumschaltgeräten nicht ausreichend. Bei der Konditionierung mit Wechselspannung hat sich gezeigt, dass durch eine längere Wechselspannungsbelastung ein anderer Durchschlagsmechanismus zum Tragen kommt. Durch die länger anstehende Spannung kommt es zu einem kontinuierlichen Feldemissionsstrom, der die Mikrospitzen bis zur Explosion aufheizt. Diese Art des Durchschlags ist durch eine kurze Stoßspannungsbeanspruchung nicht erreichbar. Eine Konditionierung mit beiden Spannungsformen ist deshalb notwendig.

Neben dem Konditionierungsvorgang hat sich auch gezeigt, dass andere Phänomene die dielektrische Festigkeit stärker beeinflussen, als es beim Gasdurchschlag der Fall ist.

Der Tripelpunkt (Vakuum-Metall-Keramik) ist eine sehr kritische Stelle. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Prüfkörper mit der gleichen Schlagweite, aber bei denen die Tripelpunkte besser geschirmt sind, ein besseres dielektrisches Verhalten aufweisen. Prüfkörper, bei denen die Tripelpunkte gar nicht geschirmt wurden, hatten eine extrem schlechte dielektrische Festigkeit. Hier konnte gezeigt werden, dass durch eine Reduzierung des elektrischen Feldes am Tripelpunkt und von der daraus entstehenden Verkleinerung der Schlagweite die elektrische Festigkeit gesteigert werden konnte. Die Faustregel, dass eine größere Schlagweite zu einer größeren Spannungsfestigkeit führt, kann hier also nur mit großer Vorsicht verwendet werden.

Bei der Untersuchung der Exzentrizität hat sich gezeigt, dass es durch vorhandene Abweichungen zu Felderhöhungen in den Prüfkörpern kommt, doch dass diese nicht zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für das Entstehen eines Durchschlags führen. Der Einsatz von Zentriernoppen, mit deren Hilfe die Exzentrizität verringert werden sollte, reduzierte die Exzentrizität nur im geringen Maße. Dafür entstanden an den Zentriernoppen scharfe Kanten, die dazu führten, dass der Durchschlag genau an dieser Stelle stattgefunden hat. Durch den Einsatz von Zentriernoppen verschlechterte sich das dielektrische Verhalten also, anstatt sich zu verbessern. Da die Exzentrizität und die Form der Zentriernoppen bei

den Prüflingen herstellungsbedingt vorgegeben waren, konnte keine systematische Untersuchung durchgeführt werden. Im Rahmen einer weiterführenden Arbeit könnte dieser Punkt aber genauer untersucht werden. Ergebnisse einer solchen Arbeit könnten sein, ab welcher Abweichung es zu einer Beeinflussung des Durchschlagsorts kommt, und ob Zentriernoppen so hergestellt werden können, dass sie die dielektrische Festigkeit nicht negativ beeinflussen.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass es verschiedene Punkte gibt, die bei der Entwicklung neuer Hochspannungsvakuumschaltgeräte, im Gegensatz zu gasisolierten Schaltgeräten, zu beachten gibt. Der Einfluss durch die Oberfläche und damit die potentiellen Elektronenemitter kann einen viel größeren Einfluss auf die dielektrische Festigkeit haben als die Geometrie der Elektroden. Durch den Einsatz von FEM-Software kann die Feldbelastung zwar möglichst gering gehalten werden, aber der Entwickler muss auch besondere Stellen, die durch die Produktion entstehen (Zentriernoppen, Tripelpunkte, ...) beachten, die nicht durch die FEM-Software optimiert werden können.

Nach der Konstruktion und Herstellung einer neuen Hochspannungsvakuumschaltröhre muss ein besonderes Augenmerk auf den Konditionierungsvorgang gerichtet werden. Die mit einem optimierten Konditionierungskreis erzielten Ergebnisse können die Spannungsfestigkeit in derselben Größenordnung beeinflussen wie die Parameter in der Konstruktion. Durch einen optimierten Konditionierungsvorgang ergibt sich überhaupt erst die Möglichkeit, verschiedene dielektrische Designs miteinander zu vergleichen.

Anhang

A Statistische Verfahren zur Auswertung von Durchschlagversuchen

Die in diesem Teil dargestellten statistischen Methoden sollen dabei behilflich sein die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen zu verstehen und die Messergebnisse interpretieren zu können.

Die Streuung bei Messwerten ist aufgrund der Physik immer vorhanden. Speziell in der Hochspannungstechnik werden für die Auswertung von Messungen statistische Verfahren benötigt. Dadurch können Messergebnisse charakterisiert und ausgewertet werden [Hau94].

Eine genaue Durchschlagspannung gibt es in der Hochspannungstechnik nicht, da immer wieder Faktoren vorliegen, die nicht genau bekannt sind und die die Durchschlagspannung beeinflussen. Das führt dazu, dass der Durchschlag nicht immer bei derselben Spannung stattfindet. Bei unendlich vielen Durchschlagversuchen kann der U_{d50} -Wert, bei der es mit 50 %iger Wahrscheinlichkeit zu einem Durchschlag kommt, ermittelt werden. Da in der Praxis aber nur eine begrenzte Anzahl von Messergebnissen vorliegt, sind diese Werte genaugenommen nur Schätzwerte, deren Genauigkeit mit der Anzahl der Messungen zunimmt. Mit statistischen Verfahren wird versucht, aus einer begrenzten Stichprobe eine Aussage über die Grundgesamtheit zu treffen [Küc09].

Bei Durchschlagversuchen im Vakuum ist die Streuung besonders hoch. Mithilfe der Statistik können die Messwerte gedeutet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Normalverteilung vorliegt und so kann anhand von Gleichung (1) und (2) die sichere Stehspannung U_{d0} , bei der es mit 0,1 %iger Wahrscheinlichkeit zum Durchschlag kommen kann und die sichere Durchschlagspannung U_{d100} , bei der es mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9 % zum Durchschlag kommt, bestimmt werden.

$$U_{d100} = \bar{U}_m + 3s_e \quad (1)$$

$$U_{d0} = \bar{U}_m - 3s_e \quad (2)$$

Dabei ist \bar{U}_m der arithmetische Mittelwert der gemessenen Durchschlagsspannungen und entspricht dem Mittelwert μ der Grundgesamtheit. Die empirische Standardabweichung

s_c bei n Messwerten, wobei U_i der i -te Messwert ist, wird nach (3) berechnet und entspricht der Standardabweichung σ .

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U}_m)^2} \quad (3)$$

Die Standardabweichung ist die durchschnittliche Entfernung aller Messwerte zum Mittelwert. Bei normalverteilten Messwerten gilt, dass innerhalb einer Standardabweichung 68 % aller Messwerte liegen und innerhalb zweier Standardabweichungen 95 % aller Messwerte. Hierbei muss beachtet werden, dass abweichend von den Durchschlägen im Gas keine Normalverteilung vorliegt, da es für diese notwendig ist, dass die Ergebnisse statistisch voneinander unabhängig sind. Der Vakuumdurchschlag ist abhängig vom Zustand der Oberfläche und jeder Durchschlag verändert diese. Durch statistische Tests kann überprüft werden, ob Werte voneinander abhängig sind. Ein Test zur Überprüfung auf Normalverteilung ist der Shapiro-Wilk-Test. Bei diesem Signifikanztest wird die Testgröße W_{test} nach Gleichung (4) berechnet.

$$W_{\text{test}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i U_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} \quad (4)$$

Dabei sind a_i Koeffizienten aus Tabellen, $U_{(i)}$ der i -te Wert der sortierten Messwerte und \bar{U} der Mittelwert. Wenn W_{test} größer als die kritische Testgröße $W_{\text{test-krit}}$ ist, liegt eine Normalverteilung vor. Dabei wird $W_{\text{test-krit}}$ in Abhängigkeit des Signifikanzniveaus α aus einer Tabelle gewählt. Üblicherweise wird $\alpha = 0,05$ gewählt, was bedeutet, dass die maximal zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit bei 5 % liegt. Heutzutage werden diese Tests mit Computern durchgeführt die meist auch den p -Wert ausgeben. Der p -Wert sagt aus, wie wahrscheinlich es ist, dass Stichproben normalverteilt sind und wird aus W berechnet. Der p -Wert muss also unter dem Signifikanzniveau liegen, damit die Messwerte normalverteilt sind [Hal13] [Hau94] [Ron94] [Sha65].

Neben dem Test auf Normalverteilung kann mit einem ähnlichen Verfahren überprüft werden, ob bei zwei Messungen mit unterschiedlichen Messmethoden, bei unterschiedlich großen Teilpopulationen, der Unterschied zufällig ist, oder ob ein systematischer

Fehler wahrscheinlicher ist. In der Statistik wird von einem unverbundenen Zweistichprobenproblem gesprochen, das mithilfe des Zweistichproben-t-Tests überprüft werden kann. Die Testgröße T_{test} berechnet sich in dem Fall nach Gleichung (5).

$$T_{\text{test}} = \frac{\bar{X}_n - \bar{Y}_m}{s_{\text{pool}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \quad (5)$$

Dabei ist \bar{X}_n der arithmetische Mittelwert der Daten aus der ersten Teilpopulation mit n Elementen und \bar{Y}_m der arithmetische Mittelwert der Daten aus der zweiten Teilpopulation mit m Elementen. Der gepoolte Schätzer s_{pool}^2 für σ^2 berechnet sich nach Gleichung (6).

$$s_{\text{pool}}^2 = \frac{1}{n + m + 2} \left(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2 + \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y}_m)^2 \right) \quad (6)$$

Analog zum Shapiro-Wilk-Test wird angenommen, dass die Unterschiede systematisch sind, wenn T_{test} größer als die kritische Testgröße $T_{\text{test-krit}}$ ist. Auch hier wird $T_{\text{test-krit}}$ in Abhängigkeit des Signifikanzniveaus α aus einer Tabelle gewählt. Üblicherweise wird $\alpha = 0,05$ gewählt [Han02].

B Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist ein statistisches Analyseverfahren, mit dessen Hilfe die Beziehung zwischen einer abhängigen Variable und mehreren unabhängigen Variablen modelliert werden kann. Der durch das Regressionsverfahren ermittelte funktionale Zusammenhang kann dazu verwendet werden ein Vorhersagemodell zu erstellen. Die Regressionsanalyse wird heutzutage hauptsächlich mithilfe des Computers erstellt. Anhand der linearen Regression soll das Verfahren erklärt werden [Urb11].

Bei der linearen Regression wird eine Gleichung in der Form:

$$y = f(x) = mx + n \quad (0.1)$$

gesucht. Nach der Methode der kleinsten Quadrate soll die Gleichung (0.2) unter der Bedingung gefunden werden, dass die Summe der Quadrate der Abweichungen von $y - \hat{y}$ minimal ist.

$$\hat{y} = f(\hat{x}) = m\hat{x} + n \quad (0.2)$$

Mathematisch ausgedrückt sieht das folgendermaßen aus:

$$V = \sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (0.3)$$

Um die Konstanten m und n zu erhalten, werden von Gleichung (0.3) die partiellen Ableitungen $\frac{dV}{dm}$ und $\frac{dV}{dn}$ gebildet und gleich Null gesetzt. Das führt zu folgenden Ergebnissen:

$$m = \frac{\overline{x_i y_i} - \bar{y}_i \bar{x}_i}{\overline{x_i^2} - \bar{x}_i^2} \quad (0.4)$$

$$n = \frac{\overline{x_i y_i} - \bar{y}_i \bar{x}_i}{\overline{x_i^2} - \bar{x}_i^2} \bar{x}_i \quad (0.5)$$

Bei der potentiellen Regression ist die Grundgleichung:

$$y = f(x) = mx^n \quad (0.6)$$

Die restliche Berechnung erfolgt dann analog zur linearen Variante [Urb11].

C Detaillierte Übersicht über die einzelnen Messergebnisse der Stehspannungsprüfung mit Blitzstoßspannung

Dieser Teil enthält die ausführlichen Messergebnisse der Untersuchung aus Kapitel 6.1. Die Messwerte zeigen, ob unterschiedliche Spannungsfestigkeit bei unterschiedlichen Konditionierungsstoßspannungsformen ausgeschlossen werden können bzw. ob es ein Unterschied gibt, wenn sich die Stoßspannungsformen bei der Konditionierung und bei der Stehspannungsermittlung unterscheidet.

U_{halte} : siehe Kapitel 6.1

U : Prüfspannung

P^- : Anzahl der Durchschläge/Gesamtanzahl der Stoßspannungsbeanspruchungen (15) bei negativer Polarität

P^+ : Anzahl der Durchschläge/Gesamtanzahl der Stoßspannungsbeanspruchungen (15) bei positiver Polarität

Prüf- ling: R_{begrenz}	KLG10N			
	U_{Halte}	U	P^-	P^+
860 Ω	0,7	104,2	0	0
	0,8	118,8	0	0
	0,9	136,5	0	0
	1	150,5	0	0
	1,1	165,3	0	0
	1,2	180,7	0,06667	0,066667
	1,3	194,5	0,06667	0,066667
	1,4	-	-	-
	0,7	104,2	0	0
18,3 k Ω	0,8	118,8	0	0
	0,9	136,5	0	0
	1	150,5	0	0
	1,1	165,3	0	0
	1,2	180,7	0	0
	1,3	194,5	0	0
	1,4	-	-	-

Prüfling: KLG7O				
<i>R</i> _{begrenz}	<i>U</i> _{Halte}	<i>U</i>	<i>P</i> ₋	<i>P</i> ₊
860 Ω	0,7	207	0	0,133333
	0,8	235	0	0
	0,9	265	0	0,666667
	1	293	0	1
	1,1	322	1	1
	1,2	-	-	-
	1,3	-	-	-
	1,4	-	-	-
18,3 kΩ	0,7	207	0,46667	0
	0,8	235	0	0
	0,9	265	0	0
	1	293	0,6	1
	1,1	322	0,8	1
	1,2	352	1	1
	1,3	-	-	-
	1,4	-	-	-

Prüfling: KKO4N				
<i>R</i> _{begrenz}	<i>U</i> _{Halte}	<i>U</i>	<i>P</i> ₋	<i>P</i> ₊
860 Ω	0,7	215	0	0
	0,8	245	0	0
	0,9	275	0	0
	1	309	0,06667	0,066667
	1,1	336	0,8	0,733333
	1,2	371	1	1
	1,3	407	-	-
	1,4	433	-	-
18,3 kΩ	0,7	215	0	0
	0,8	245	0	0,066667
	0,9	275	0	0
	1	309	0,13333	0
	1,1	336	0	0,066667
	1,2	371	0,26667	0,8
	1,3	407	0,86667	0,933333
	1,4	433	1	1

Prüfling: KLG10				
<i>R</i> _{begrenz}	<i>U</i> _{Halte}	<i>U</i>	<i>P</i> ₋	<i>P</i> ₊
860 Ω	0,7	178,1	0	0
	0,8	201,3	0	0
	0,9	230,8	0	0
	1	251,5	0	0,133333
	1,1	276,5	0,2	0,933333
	1,2	301,6	1	1
	1,3	326,7	-	-
	1,4	-	-	-
18,3 kΩ	0,7	178,1	0	0
	0,8	201,3	0	0
	0,9	230,8	0	0
	1	251,5	0	0
	1,1	276,5	0	0,866667
	1,2	301,6	0	1
	1,3	326,7	1	1
	1,4	-	-	-
Prüfling: KKG40				
<i>R</i> _{begrenz}	<i>U</i> _{Halte}	<i>U</i>	<i>P</i> ₋	<i>P</i> ₊
860 Ω	0,7	238	0,06667	0
	0,8	272	0,13333	0,066667
	0,9	305	0,53333	0,2
	1	339	1	0,2
	1,1	372	1	0,333333
	1,2	405	1	0,866667
	1,3	438	1	1
	1,4	-	-	-
18,3 kΩ	0,7	238	0	0,066667
	0,8	272	0	0
	0,9	305	0,06667	0
	1	339	0,06667	0,2
	1,1	372	0,4	0,066667
	1,2	405	0,33333	0,133333
	1,3	438	0,93333	1
	1,4	-	-	-

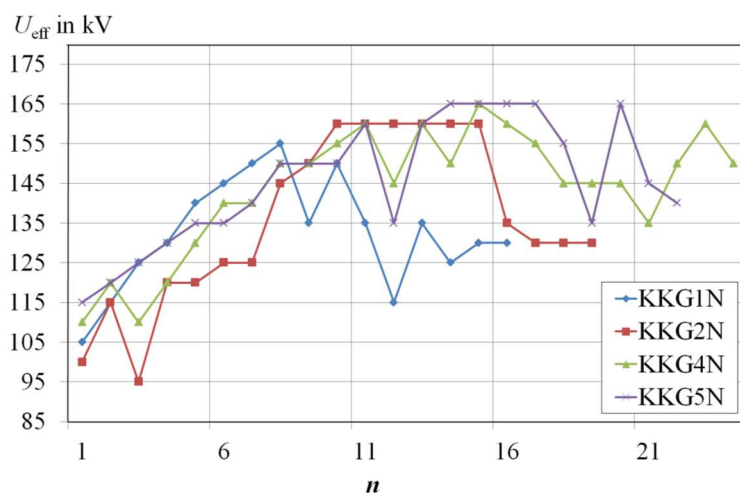
Prüf- ling: R_{begrenz}	KKG50			
	U_{Halte}	U	P_{-}	P_{+}
860 Ω	0,7	231	0	0,067
	0,8	264	0	0
	0,9	295	0	0
	1	328	0	0,067
	1,1	362	1	0
	1,2	394	1	1
	1,3	231	-	-
	1,4	-	-	-
18,3 k Ω	0,7	231	0	0
	0,8	264	0	0
	0,9	295	0	0
	1	328	0	0
	1,1	362	0,4	0,267
	1,2	394	1	1
	1,3	231	-	-
	1,4	-	-	-
Prüf- ling: R_{begrenz}	KKG3N			
	U_{Halte}	U	P_{-}	P_{+}
860 Ω	0,7	232	0	0
	0,8	267	0	0
	0,9	299	0,067	0
	1	332	0,067	0,2
	1,1	362	0,933	0,867
	1,2	398	1	1
	1,3	-	-	-
	1,4	-	-	-
18,3 k Ω	0,7	232	0	0
	0,8	267	0	0
	0,9	299	0	0
	1	332	0	0
	1,1	362	0,13	0,267
	1,2	398	1	1
	1,3	-	-	-
	1,4	-	-	-

Prüf- ling: <i>R</i> _{begrenz}	KLG6N			
	<i>U</i> _{Halte}	<i>U</i>	<i>P</i> ₋	<i>P</i> ₊
860 Ω	0,7	165,5	0	0,066667
	0,8	189,9	0	0
	0,9	213,1	0	0
	1	235	0	0,066667
	1,1	259,7	0	0,333333
	1,2	283	1	1
	1,3	307	0,933333	1
	1,4	-	-	-
18,3 kΩ	0,7	165,5	0	0
	0,8	189,9	0	0
	0,9	213,1	0	0,066667
	1	235	0	0,2
	1,1	259,7	0,266667	0,4
	1,2	283	0	0,6
	1,3	307	0	1
	1,4	-	-	-
Prüf- ling: <i>R</i> _{begrenz}	KKO4O			
	<i>U</i> _{Halte}	<i>U</i>	<i>P</i> ₋	<i>P</i> ₊
860 Ω	0,7	245	0	0
	0,8	262	0	0
	0,9	322	0	0,2
	1	351	0,266667	0,733333
	1,1	386	1	1
	1,2	-	-	-
	1,3	-	-	-
	1,4	-	-	-
18,3 kΩ	0,7	245	0	0
	0,8	262	0	0
	0,9	322	0,133333	0
	1	351	0	0
	1,1	386	0,266667	1
	1,2	421	1	0
	1,3	-	-	-
	1,4	-	-	-

Prüfling: KKO50				
<i>R</i> _{begrenz}	<i>U</i> _{Halte}	<i>U</i>	<i>P</i> ₋	<i>P</i> ₊
860 Ω	0,7	212	0	0
	0,8	240	0	0
	0,9	270	0	0
	1	302	0	0
	1,1	330	0,06667	0,133333
	1,2	360	0,6	0,266667
	1,3	386	0,4	0,2
	1,4	414	1	0,333333
18,3 kΩ	0,7	212	0	0
	0,8	240	0	0
	0,9	270	0	0
	1	302	0,73333	1
	1,1	330	0	1
	1,2	360	0,13333	1
	1,3	386	0,73333	0
	1,4	414	0,53333	

D Konditionierungsverlauf und Konditionierungskennzahlen der Wechsellspannungsmessung

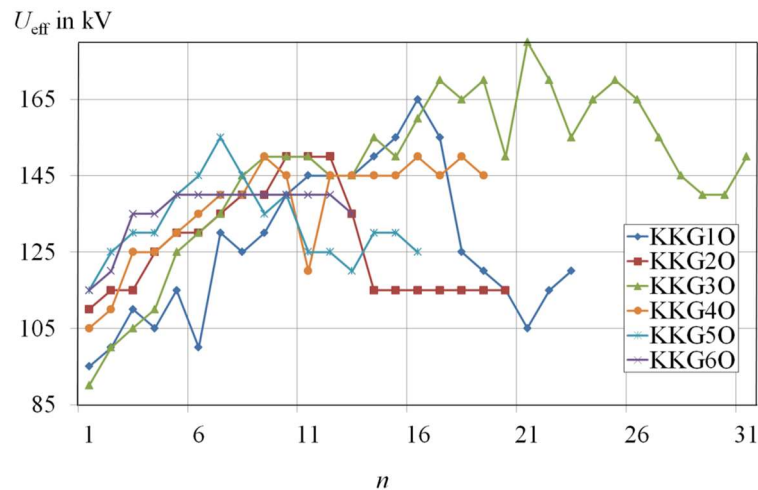
In diesem Teil befinden sich die Konditionierungsverläufe und die Tabellen mit den entsprechenden Konditionierungskennzahlen der einzelnen Prüfkörper für Wechsellspannung. Die daraus ermittelten Mittelwerte befinden sich in Kapitel 6.1.2.



Konditionierungsverlauf für Wechsellspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKGXN mit 70 mm Keramik

Konditionierungskennzahlen für Wechsellspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKGXN mit 70 mm Keramik

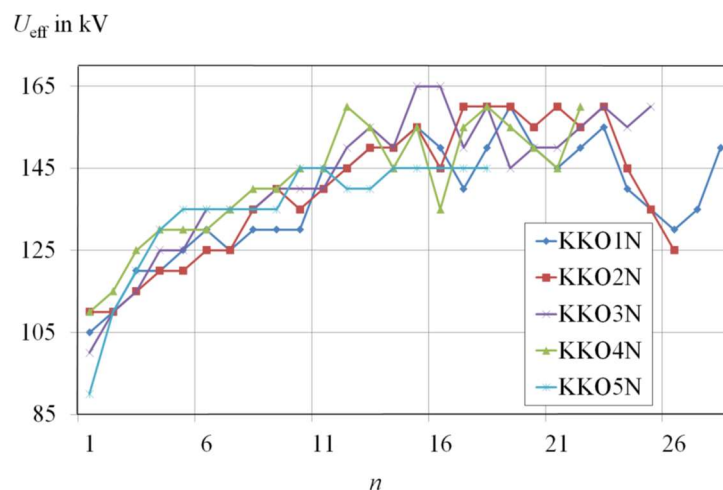
Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG1N	50	0,38	0,31
KKG2N	60	0,39	0,37
KKG4N	55	0,4	0,25
KKG5N	50	0,4	0,36
Mittelwert	53,75	0,4	0,32
Standardabweichung	4,79	0,01	0,06



Konditionierungsverlauf für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKGXO mit 70 mm Keramik

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKGXO mit 70 mm Keramik

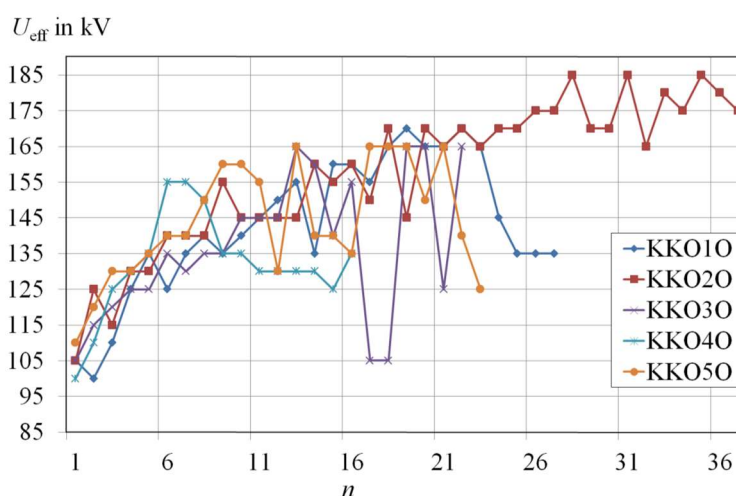
Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG1O	70	0,36	0,57
KKG2O	40	0,32	0,55
KKG3O	90	0,39	0,19
KKG4O	45	0,32	0,26
KKG5O	40	0,33	0,63
KKG6O	25	0,3	0,15
Mittelwert	51,67	0,34	0,39
Standardabweichung	23,8	0,03	0,21



Konditionierungsverlauf für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKOXN mit 70 mm Keramik

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKOXN mit 70 mm Keramik

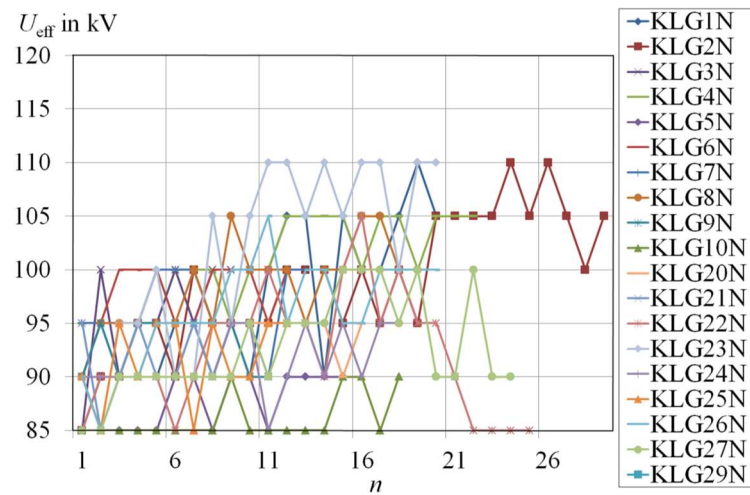
Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKO1N	55	0,44	0,39
KKO2N	50	0,44	0,31
KKO3N	65	0,45	0,2
KKO4N	50	0,44	0,27
KKO5N	55	0,4	0,11
Mittelwert	55	0,43	0,26
Standardabweichung	6,12	0,02	0,1



Konditionierungsverlauf für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKOXO mit 70 mm Keramik

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKOXO mit 70 mm Keramik

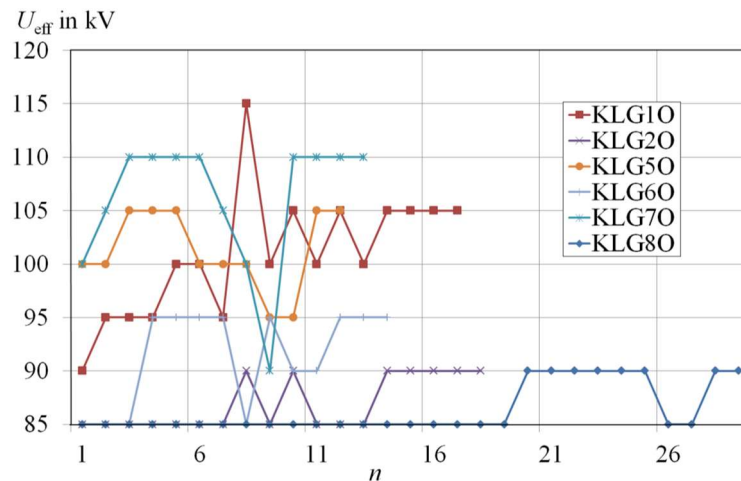
Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKO1O	65	0,37	0,44
KKO2O	80	0,4	0,22
KKO3O	60	0,36	0,41
KKO4O	55	0,34	0,25
KKO5O	55	0,36	0,35
Mittelwert	63	0,37	0,33
Standardabweichung	10,3	0,02	0,09



Konditionierungsverlauf für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KLGXN mit 70 mm Keramik

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KLGXN mit 70 mm Keramik

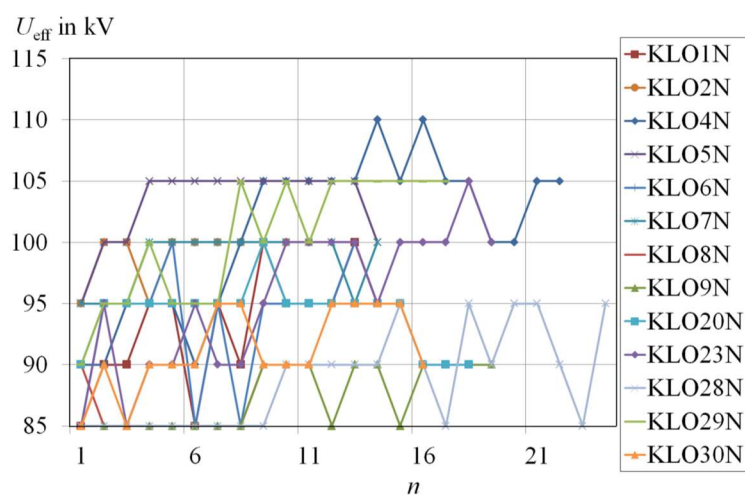
Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLG1N	20	0,35	0,55
KLG2N	25	0,35	0,45
KLG3N	15	0,32	0,18
KLG4N	10	0,34	0,23
KLG5N	5	0,29	0,47
KLG6N	10	0,32	0,08
KLG7N	5	0,32	0,53
KLG8N	15	0,34	0,42
KLG9N	5	0,3	0,45
KLG10N	5	0,29	0,78
KLG20N	5	0,3	0,44
KLG21N	0	0,3	0,5
KLG22N	20	0,34	0,52
KLG23N	25	0,35	0,35
KLG24N	5	0,3	0,67
KLG25N	5	0,3	0,5
KLG26N	15	0,34	0,55
KLG27N	15	0,32	0,58
KLG29N	25	0,35	0,3
Mittelwert	12,11	0,32	0,45
Standardabweichung	8,05	0,02	0,17



Konditionierungsverlauf für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KLGXO mit 70 mm Keramik

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KLGXO mit 70 mm Keramik

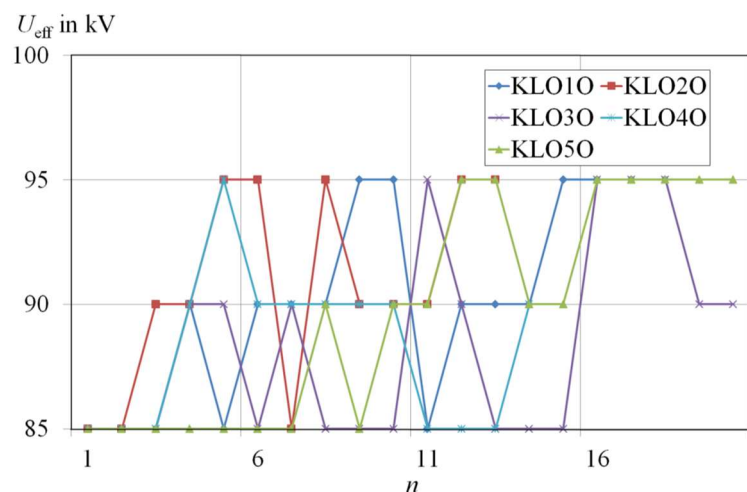
Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLG10	25	0,29	0,71
KLG20	5	0,23	0,61
KLG50	5	0,27	0,58
KLG60	10	0,24	0,29
KLG70	10	0,28	0,23
KLG80	5	0,23	0,72
Mittelwert	10	0,26	0,52
Standardabweichung	7,75	0,03	0,21



Konditionierungsverlauf für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KLOXN mit 70 mm Keramik

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KLOXN mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLO1N	15	0,36	0,36
KLO2N	5	0,36	0,18
KLO4N	20	0,4	0,32
KLO5N	10	0,38	0,07
KLO6N	15	0,36	0,23
KLO7N	5	0,36	0,29
KLO8N	0	0,33	0,7
KLO9N	5	0,33	0,53
KLO20N	10	0,36	0,22
KLO23N	20	0,38	0,32
KLO28N	10	0,34	0,46
KLO29N	15	0,38	0,35
KLO30N	10	0,34	0,13
Mittelwert	10,77	0,36	0,32
Standardabweichung	6,07	0,02	0,17



Konditionierungsverlauf für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KLOXO mit 70 mm Keramik

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KLOXO mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLO1O	10	0,29	0,28
KLO2O	10	0,29	0,23
KLO3O	10	0,29	0,5
KLO4O	10	0,29	0,43
KLO5O	10	0,29	0,4
Mittelwert	10	0,29	0,37
Standardabweichung	0	0	0,11

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie KKOXO mit 45 mm Keramik:

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKO1O45	40	0,42	0,28
KKO2O45	25	0,4	0,63
KKO3O45	35	0,42	0,42
KKO4O45	25	0,4	0,18
KKO5O45	35	0,45	0,23
Mittelwert	32	0,42	0,35
Standardabweichung	6,71	0,02	0,17

Konditionierungskennzahlen für Wechselspannungsprüfung der Dampfschirmgeometrie OOOXO mit 45 mm Keramik:

Prüfkörper	U_R in kV	η_D
OOO20O45	20	0,32
OOO21O45	20	0,5
OOO23O45	0	0,92
OOO24O45	25	0,58
OOO26O45	20	0,27
Mittelwert	17	0,52
Standardabweichung	9,75	0,26

E Konditionierungskennzahlen der Stoßspannungsmessung

In diesem Teil befinden sich die Konditionierungsverläufe und die Tabellen mit den entsprechenden Konditionierungskennzahlen der einzelnen Prüfkörper für Stoßspannung. Die daraus ermittelten Mittelwerte befinden sich in Kapitel 6.1.3 bis 6.1.5.

Konditionierungskennzahlen für positive Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \, \Omega$) bei großer Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG2N	180,2	0,98	0,3
KKG3N	212	1	0,18
KKG1O	269,5	1	0,24
KKG6O	149,6	0,95	0,48
KKO2N	177,7	0,97	0,2
KKO1O	132,5	0,88	0,58
KKO3O	195,8	0,82	0,54
Mittelwert	188,19	0,94	0,36
Standardabweichung	44,72	0,07	0,17

Konditionierungskennzahlen für positive Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \, \Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLG2N	157,9	0,96	0,32
KLG3N	60,6	0,92	0,62
KLG4N	73,5	0,82	0,92
KLG5N	85,6	0,89	0,4
KLG10N	81,8	0,89	0,3
KLG2O	228,8	1	0,28
KLG7O	27,3	0,73	0,88
KLG9O	99,5	0,69	0,22
KLO1N	139,2	0,92	0,38
KLO1O	121,7	0,97	0,5
KLO2O	126,1	0,86	0,46
KLO3O	194,7	1	0,28
KLO4O	100	0,83	0,18
KLO5O	68,4	0,85	0,62
Mittelwert	111,79	0,88	0,45
Standardabweichung	54,58	0,09	0,23

Konditionierungskennzahlen für negative Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \, \Omega$) bei großer Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG2N	180,2	0,98	0,3
KKG3N	124,9	0,97	0,72
KKG10	209,2	0,83	0,1
KKG6O	123,3	0,8	0,52
KKO2N	88	1	0,44
KKO1O	60,5	0,81	0,86
KKO3O	148,8	1	0,58
Mittelwert	133,56	0,91	0,5
Standardabweichung	51,19	0,09	0,25

Konditionierungskennzahlen für negative Normblitzstoßspannung ($R_{\text{begrenz}} = 860 \, \Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLG2N	104,4	1	0,28
KLG3N	86,1	0,86	0,44
KLG4N	133,8	0,94	0,48
KLG5N	115	0,87	0,08
KLG10N	57	0,85	0,38
KLG2O	108,8	0,99	0,58
KLG4O	89,7	0,59	0,16
KLG7O	150,8	0,81	0,34
KLO1N	85,4	0,99	0,32
KLO1O	79,3	0,81	0,22
KLO2O	92,8	0,8	0,24
KLO3O	86,2	0,81	0,3
KLO4O	110,9	0,89	0,46
KLO5O	92,8	0,81	0,24
Mittelwert	99,5	0,86	0,32
Standardabweichung	23,61	0,11	0,14

Konditionierungskennzahlen für positive 16/80-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \, \text{k}\Omega$) bei großer Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG3O	139,7	0,79	0,2
KKG4O	79,8	0,76	0,3
KKO5N	77,8	0,93	0,44
KKG5O	111,4	0,79	0,38
KKO4N	72,6	0,88	0,24
KKO5N	77,8	0,93	0,44
KKO6O	175,4	0,83	0,18
Mittelwert	104,93	0,85	0,31
Standardabweichung	39,51	0,07	0,11

Konditionierungskennzahlen für positive 16/80-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLG6N	48,1	0,82	0,22
KLG7N	125,8	0,86	0,1
KLG8N	88,4	0,91	0,18
KLG9N	114	0,88	0,16
KLG10	63,4	0,7	0,4
Mittelwert	87,94	0,83	0,21
Standardabweichung	32,8	0,08	0,11

Konditionierungskennzahlen für negative 16/80-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei großer Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG3O	106,2	0,79	0,24
KKG4O	80,8	0,63	0,14
KKO5O	85,9	0,73	0,54
KKO3N	59,8	0,94	0,5
KKO4N	72,6	0,94	0,52
KKO5N	79,2	0,94	0,56
KKO6O	68,3	0,83	0,46
Mittelwert	78,97	0,83	0,42
Standardabweichung	14,8	0,12	0,16

Konditionierungskennzahlen für negative 16/80-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLG6N	65,3	0,82	0,46
KLG7N	89,1	0,79	0,42
KLG8N	82	0,75	0,12
KLG9N	71,6	0,8	0,2
KLG10	92,8	0,89	0,16
Mittelwert	80,16	0,81	0,27
Standardabweichung	11,59	0,05	0,16

Konditionierungskennzahlen für positive 30/115-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) bei großer Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG4N	68,3	0,83	0,4
KKG5N	108,9	0,84	0,22
KKO4O	120,6	0,75	0,16
KKO5O	189,9	0,85	0,16
Mittelwert	121,93	0,82	0,24
Standardabweichung	50,56	0,05	0,11

Konditionierungskennzahlen für positive 30/115-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLG20N	86,4	0,87	0,34
KLG21N	96,9	0,93	0,66
KLG50	67,7	0,66	0,06
KLG60	126,3	0,67	0,14
KLO5N	132,7	0,94	0,06
KLO7N	128,3	0,91	0,04
Mittelwert	106,38	0,83	0,13
Standardabweichung	26,67	0,13	0,11

Konditionierungskennzahlen für negative 30/115-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) bei großer Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKG4N	164,7	0,86	0,08
KKO40	47,3	0,83	0,52
KKO50	51,7	0,74	0,6
Mittelwert	87,9	0,8	0,4
Standardabweichung	66,55	0,06	0,28

Konditionierungskennzahlen für negative 30/115-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLG20N	70,8	0,83	0,48
KLG21N	64,4	0,84	0,5
KLG50	73,6	0,68	0,16
KLG60	74	0,62	0,24
KLO5N	59,8	1	0,7
KLO7N	65,7	0,83	0,3
Mittelwert	68,05	0,8	0,4
Standardabweichung	5,67	0,13	0,2

Konditionierungskennzahlen für positive 34/125-Stoßspannungsimpulse mit zusätzlicher Parallelkapazität ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$, $C_P = 1,13 \text{ nF}$) und 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLO2N	53,9	0,53	0,92
KLO9N	121,5	0,51	0,14
Mittelwert	87,7	0,52	0,53
Standardabweichung	47,8	0,02	0,55

Konditionierungskennzahlen für negative 34/125-Stoßspannungsimpulse mit zusätzlicher Parallelkapazität ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$, $C_P=1,13\text{nF}$) und 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLO2N	24,5	0,54	0,8
KLO9N	45,3	0,48	0,72
Mittelwert	34,9	0,51	0,76
Standardabweichung	14,7	0,04	0,06

Konditionierungskennzahlen für positive 56/204-Stoßspannungsimpulse mit zusätzlicher Parallelkapazität ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$, $C_P=1,13\text{nF}$) und 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLO6N	99,9	0,57	0,32
KLO8N	73,6	0,46	0,02
Mittelwert	86,75	0,52	0,17
Standardabweichung	18,6	0,08	0,21

Konditionierungskennzahlen für negative 56/204-Stoßspannungsimpulse mit zusätzlicher Parallelkapazität ($R_{\text{begrenz}} = 50 \text{ k}\Omega$, $C_P=1,13\text{nF}$) und 70 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KLO6N	16,6	0,52	0,96
KLO8N	54,9	0,43	0,52
Mittelwert	35,75	0,47	0,74
Standardabweichung	27,08	0,06	0,31

Konditionierungskennzahlen für positive 16/80-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 45 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKO1O45	133,3	0,88	0,02
KKO2O45	66,9	0,83	0,5
KKO3O45	73,7	0,89	0,4
KKO4O45	43,1	0,91	0,64
KKO5O45	44,1	0,98	0,66
Mittelwert	72,22	0,9	0,44
Standardabweichung	36,74	0,05	0,26

Konditionierungskennzahlen für negative 16/80-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) bei kleiner Schlagweite mit 45 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_A	η_D
KKO1O45	37,1	0,83	0,66
KKO2O45	28,8	0,8	0,66
KO3O45	53,9	1	0,82
KKO4O45	45,2	0,9	0,72
KKO5O45	42	0,95	0,48
Mittelwert	41,4	0,9	0,67
Standardabweichung	9,33	0,08	0,12

Konditionierungskennzahlen für positive 16/80-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) ohne Dampfschirme mit 45 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_D
OOO20O45	13,9	0,98
OOO21O45	0	0,98
OOO23O45	27,7	0,96
OOO25O45	7,7	0,98
OOO26O45	30	0,98
Mittelwert	15,86	0,98
Standardabweichung	12,87	0,01

Konditionierungskennzahlen für negative 16/80-Stoßspannungsimpulse ($R_{\text{begrenz}} = 18,3 \text{ k}\Omega$) ohne Dampfschirme mit 45 mm Keramik

Prüfkörper	U_R in kV	η_D
OOO20O45	68,01	0,98
OOO21O45	0	0,98
OOO23O45	28,05	0,68
OOO25O45	32,4	0,98
OOO26O45	34,53	0,96
Mittelwert	32,59	0,92
Standardabweichung	24,2	0,13

Literaturverzeichnis

- [Bal93] J. Ballat: „Untersuchungen zum Emissionsstrom-, Konditionierungs- und Schweißverhalten von Vakuum-Schaltstrecken mit CuCr-Kontaktstücken“, Darmstadt: Dissertation TU Darmstadt, 1993
- [Bla11] J.T. Black, R.A. Kohser: „DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing“, 11: Wiley, 2011, ISBN: 978-0470924679
- [Bru42] H. Brunning: „Die Sekundär-Elektronen-Emission fester Körper“, Berlin: Springer Verlag, 1942, ISBN: 978-3-642-88894-6
- [Cro78] J.D. Cross: „High-Speed Photography of Surface Flashover in Vacuum“, Ontario: IEEE Trans.Electr. Insul. Vol.E1-13 No. 3, 1978
- [Czi13] H. Czichos: „Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften“, 31. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2013, ISBN: 978-3-662-06653-9
- [Dan96] M.G. Danikas: „Influence of Electrode Area on the Conditioning Effect in Vacuum“, Xanthi: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.3 No.2, 1996
- [Del08] T. Delachaux, O. Fritz, D. Gentsch, E. Schade, D.L. Shmelev: „Modeling and Simulation Results of a High Current Vacuum Arc in a Transverse Magnetic Field“, Bukarest: Proceedings of the XXIII-rd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2008
- [deT73] C.H. de Turreil, K.D. Srivastava, U.J. Woelke: „Experimental Observation of Surface Charging of High-Voltage Insulators for Vacuum Apparatus“: IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-7, No. 4, 1973
- [Dil06] U. Dilthey: „Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, Schweiß- und Schneidtechnologien“, 3., bearbeitete Auflage, Heidelberg: Springer Verlag, 2006, ISBN: 3-540-21673-1
- [Fal04] L.T. Montillet, G.F. Falkingham: „A History of Fifty Years of Vacuum Interrupter Development. (The English Connection)“, Denver: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004, ISBN: 0-7803-8465-2
- [Fin06] H. Fink, D. Gentsch, B. Heil, C. Humpert, A. Schnettler: „Conditioning of Series Vacuum Interrupters (VIs) for Medium Voltage by Applying High-

- Frequency (HF) Current to Increase the Dielectric Strength of VIs“, Matsue: Proceedings of the XXIIInd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2006, ISBN: 1-4244-0191-7
- [Fis89] M. Fisz: „Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik“, Deutscher Verlag der Wissenschaft, 1989, ISBN: 978-3326000794
- [Fow28] R.H., Nordheim, L.W. Fowler: „Electron emission in intense electric fields“, London: The Royal Society, 1928, ISBN: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Vol. 119, No. 781 (May 1, 1928), pp. 173-181
- [Fuk07] Y. Fukuoka, T. Yasuoka, K. Kato: „Breakdown Conditioning Characteristics of Long Gap Electrodes in a Vacuum“, Nagoya: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 3, 2007, ISBN: 1070-9878
- [Gar02] R.D. Garzon: „High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications“, Second Edition, Revised and Expanded, Basel: Marcel Dekker Inc., 2002, ISBN: 0-8247-0799-0
- [Gar97] R.D. Garzon: „High Voltage Circuit Breakers“, New York: Marcel Dekker Inc., 1997, ISBN: 0 8247 9821-x
- [Gie02] S. Giere: „Vakuumschalttechnik im Hochspannungseinsatz“, Braunschweig: Dissertation TU Carolina-Wilhelmina zu Braunschweig, 2002
- [Gol90] M. Gollor: „Der Zeitliche Ablauf des Vakuumdurchschlags unter Impulsbeanspruchung“, Braunschweig: Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1990
- [Gra14] I. Gramberg: „Untersuchung der inneren Blitzstoßspannungsfestigkeit von Vakuumschaltkammern nach Ausschaltversuchen“, Braunschweig: Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2014
- [Gre94] A. Greenwood: „Vacuum Switchgear“, London: The Institution of Electrical Engineers, 1994, ISBN: 0 58296 855 8
- [Grz83] S. Grzybowski, J. E. Thompson: „Electrical Surface Strength and Surface Deterioration of Thermoplastic Insulators in Vacuum“, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-18 No.3, 1983

- [Hac75] R. Hackam: „Effects of voltage polarity, electric current, external resistance, number of sparkings, supply frequency and addition of hydrogen and air on electrical breakdown in vacuum“, Sheffield: Journal of Applied Physics 46, 1975
- [Hal13] P. Halbach: „Einfluss des Prüfkreises auf das Abreißstromverhalten von Vakuumschaltern unter Berücksichtigung spezieller Netzkonfigurationen in der Mittelspannung“, Darmstadt: Dissertation TU Darmstadt, 2013
- [Han02] A. Handl: „Multivariate Analysemethoden, Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS“, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002, ISBN: 978-3-540-43386-6
- [Hau94] W. Hauschild, W. Mosch: „Statistik für Elektrotechniker, Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik“, Berlin: VEB Verlag Technik, 1994
- [Hei06] B. Heil: „Untersuchungen zur Hochfrequenzkonditionierung von Vakuumschaltkammern“, Aachen: Dissertation RWTH Aachen, 2006
- [Hyr15] M. Hintzen, T. Müller, P. Owens, J. Hyrenbach: „Alternative Gas Insulation in Medium-Voltage Switchgears“, Lyon: 23rd International Conference in Electric Distribution (CIRED), 2015
- [Ina04] Y. Inagawa, F. Miyazaki, K. Kato, M. Sakaki, H. Ichikawa, H. Okubo: „Effect of Electrode Surface Roughness on Breakdown Conditioning Process under Non-uniform Electric Field in Vacuum“, Nagoya: IEEE, 2004, ISBN: 0-7803-8461-x
- [Kat06] K. Kato, T. Yasuoka, Y. Fukuoka, H. Saitoh, M. Sakaki, H. Okubo: „Investigation of Electrode Conditioning Mechanism in Vacuum with Impulse Voltage Application“, Matsue: Proceedings of the XXII Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2006, ISBN: 1-4244-0191-7
- [Koj10] H. Kojima, H. Yasukawa, R. Nishimura, H. Okubo, H. Sato, H. Saito, Y. Noda: „Improvement of Cu-Cr Electrode Surface under Impulse Voltage Conditioning in Vacuum“, Nagoya: IEEE, 2010, ISBN: 978-1-4244-8286-3
- [Koj14] H. Kojima, Y. Otake, M. Sakaki, H. Saito, K. Hasegawa, N. Hayakawa: „Conditioning Development in Vacuum Based on Breakdown Probability

- Distribution“, Mumbai: Proceedings of the XXVI Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2014, ISBN: 978-1-4799-6751-3
- [Kön85] D. König, H. Schmidt: „Breakdown Voltage of Conditioned 24 kV-Vacuum Tubes as a Funktion of Ramp Rate“, Darmstadt: IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-20 No.4, 1985
- [Küc09] A. Küchler: „Hochspannungstechnik - Grundlagen - Technologie - Anwendungen“, 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2009, ISBN: 3-540-78413-5
- [Lan99] Y. Lanjun, F. Yunoing, Z. Wenyuan, W. Jimei, Q. Yuchang: „Study on Spark Conditioning of Vacuum Switch With A Parallel Capacitor“, Xi'an: Proceedings of the High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 IEE, 1999
- [Lat06] R. Latham: „High Voltage Vacuum Insulation: A New Perspective“, Bloomington: AuthorHouse, 2006, ISBN: 1-4259-4861-8
- [Lat88] R.V. Latham, T.J. Fielding: „'Local' Conditioning of broad-area Vacuum-insulated High-Voltage Electrodes“, Birmingham: IEE Proceedings, Vol. 135, Pt. A, No. 8, 1988
- [Lat95] R. Latham: „High Voltage Vacuum Insulation - Basic Concepts and Technological Practice“, London: Academic Press, 1995, ISBN: 0-12-437175-2
- [Leu12] M.B.J. Leusenkamp: „Impulse Voltage Generator Design and the Potential Impact on Vacuum Interrupter De-conditioning“, Suzhou: Proceedings of the XXVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2012, ISBN: 978-4673-1264-6
- [Lip03] H. Lippmann: „Schalten im Vakuum“, Berlin: VDE Verlag, 2003, ISBN: 978-3-8007-2317-1
- [Mil64] H.C. Miller, G.A. Farral: „Polarity Effect in Vacuum Breakdown Electrode Conditioning“, Melville: Journal of Applied Physics, Volume 36, Number 4, 1964
- [Nak91] K. Nakanishi: „Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers“, New York: Marcel Dekker, Inc, 1991, ISBN: 978-0824785437

- [Nev06] V.A. Nevrovsky: „Clump Hypothesis and Mechanisms of Breakdown Initiation in Centimeter Vacuum Gaps“, Matsue: Proceedings of the XXIIInd Int. Smyp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum(ISDEIV), 2006
- [Pie14] T Pieniak, M. Kurrat, D. Gentsch, S. Puzankov: „Experimental setup for quantifying the emission coefficient of contact material for infrared temperature measurement“, Mumbai: Proceedings of the XXVI Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2014, ISBN: 978-1-4799-6750-6
- [Reu03] C. Reuber, P. Gritti, K. Hagstrom: „The Integrated MV Circuit Breaker - A New Device Comprising Measuring, Protection and Interruption“, Barcelona: 17th Int. Conf. on Elect. Distrib. (CIRED), 2003
- [Ron94] B. Ronz, H.G. Strohe, P. Eckstein: „Lexikon Statistik“, Wiesbaden: Gabler Verlag, 1994, ISBN: 978-3-409-19952-0
- [Rya89] H.M. Ryan, G.R. Jones: „SF₆ switchgear“, London: Peter Peregrinus Ltd., 1989, ISBN: 0-86341 123 1
- [Sat03] S. Sato, K. Koyama: „Relationship between Electrode Surface Roughness and Impulse Breakdown Voltage in Vacuum Gap of Cu and Cu-Cr Electrodes“, Amagasaki-City: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 4, 2003, ISBN: 1070-9878
- [Sch04] U. Schümann, M. Budde, M. Kurrat: „Influence of Shield Capacity on the Breakdown Voltage of Vacuum Tubes“, Braunschweig: IEEE, 2004, ISBN: 0-7803-8461-X
- [Sch07] H. Schellekens, G. Gaudart: „Compact High-voltage Vacuum Circuit Breaker, a Feasibility Study“, Grenoble: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 3, 2007
- [Sen98] P. Sentker: „Die elektrische Festigkeit von Mehrfachunterbrechungen im Hochvakuum“, Aachen: Dissertation TU Braunschweig, 1998
- [Sha65] S.S. Shapiro, M.B. Wilk: „An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)“, Biometrika 3/4, 1965
- [Shi95] T. Shiori, T. Kamikawaji, E. Kaneko, M. Homma, H. Takahashi, I. Oshima: „Influence of Electrode Area on the Conditioning Effect in

- Vacuum“, Tokyo: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 2, 1995
- [Sie07] Siemens AG: „Vakuum-Schalttechnik und Komponenten für die Mittelspannung - Ihr Wegweiser“, Berlin: Siemens Produktkatalog, 2007
- [Sie12] Siemens AG: „High-Voltage goes Vacuum, The next generation in high-voltage circuit breaker technology“, Erlangen: Siemens Produktbroschüre, 2012, ISBN: E50001-D630-A196-V1-4A00
- [Sla08] P. Slade: „The Vacuum Interrupter. Theory, Design and Application“, Boca Raton: CRC Press, 2008, ISBN: 978-0-8493-9091-3
- [Sme14] R. Smeets, L. Falkingham, M. Backman: „The Impact of the Application of Vacuum Switchgear at Transmission Voltages“, Paris: Cigré, 2014, ISBN: 978-2-85873-287-6
- [Ste08] K. Steinke: „Verhalten unterschiedlicher Kontaktsysteme in Vakuumleistungsschaltern bei hohen Schaltleistungen“, Braunschweig: Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2008
- [Tak15] T. Takahashi, H. Kojima, K. Hasegawa, H. Saito, M. Sakaki, N. Hayakawa: „Breakdown Charge Dependence for Saturation of Spark Conditioning under Non-Uniform Electric Field in Vacuum“, Pilsen: Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering, 2015
- [Tio99] M. Tioursi: „Conditioning phenomena in N₂, SF₆, and air“, Oran - El-M'Naouer: IEEE, 1999
- [Urb11] D. Urban, J. Mayerls: „Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung“, 4., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011, ISBN: 978-3-531-17345-0
- [Vol05] R. Volk: „Rauheitsmessung: Theorie und Praxis“, 1. Auflage, Berlin: Beuth, 2005, ISBN: 978-34101519186
- [Wan06] J. Wang, Z. Liu, S. Xiu, Z. Wang, S. Yuan, L. Jin, H. Zhou, R. Yang: „Development of High Voltage Vacuum Circuit Breakers in China“, Matsue: XXIIInd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 2006
- [Yan12] H. Yang, Y. Geng, Z. Liu, C. Wang: „A High Efficiency Conditioning Method of Vacuum Interrupters by High Frequency Voltage Impulses“,

- Tomsk: Proceedings of the XXVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2012, ISBN: 978-1-4673-1266-0
- [Yan98] S. Yanabu, E. Kaneko: „Research and Development of axial Magnetic Field Electrode and its Application“, Eindhoven: Proceedings of the XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 1998, ISBN: 0-7803-3953-3
- [Yin09] Z. Yingyao, Z. Liu, C. Shaoyong, Y. Lanjun, G. Yingsan, W. Jimei: „Influence of Contact Contour on Breakdown Behavior in Vacuum under Uniform Field“, XI'an: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 6, 2009, ISBN: 1070-9878

Eigene Veröffentlichungen:

- [Pso13] T. Psotta, V. Hinrichsen, S. Giere, E. Kynast: „Dielectric Behavior of Different Vapor Shields in Vacuum“. In: *Proceedings of the 12th INSUCON International Electrical Insulation Conference*. Birmingham, 2013
- [Pso14] T. Psotta, V. Hinrichsen, S. Giere, E. Kynast, F. Richter, S. Wethekam: „Investigations on the Conditioning of High-Voltage Vacuum Interrupters“. In: *Proceedings of the 26th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Mumbai, 2014
- [Pso15] T. Psotta, V. Hinrichsen: „Influence of eccentrically mounted vapor shields on the dielectric strength of vacuum interrupters“. In: *Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering*. Pilsen, 2015

Im Zuge dieser Arbeit angefertigte studentische Arbeiten:

- [Boh14] N. Bohlender: „Simulation des Strom- und Spannungsverlaufes während eines Vakuumdurchschlags mit Impulsspannung“, Bachelorarbeit (Nr. 1935) bearbeitet vom 1. Juni 2014 bis zum 13. Oktober 2014
- [Che13] R. Chen: „3-Dimensionale Feldsimulation von Elektrodenanordnungen im Vakuum“, Bachelorarbeit (Nr. 1901) bearbeitet vom 1. Dezember 2012 bis zum 2. April 2013
- [Eng14] J. Engelhardt: „Aufbau einer Messeinrichtung zur Bestimmung der Exzentrizität zwischen Keramik und Dampfschirm bei vereinfachten Modellen von Vakuumschaltröhren“, Bachelorarbeit (Nr. 1922) bearbeitet vom 1. November 2013 bis zum 21. Februar 2014
- [Poh14] L. Pohl: „Untersuchung des Einflusses der Exzentrizität zwischen Keramik und Dampfschirmen bei vereinfachten Modellen von Vakuumschaltröhren auf das dielektrische Verhalten“, Bachelorarbeit (Nr. 1933) bearbeitet vom 2. Mai 2014 bis zum 28. August 2014

Lebenslauf

Torsten Psotta

geboren am 30.09.1983

in Mainz



Werdegang

- | | |
|-------------------|--|
| 04/2011 – 03/2016 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Darmstadt am Fachgebiet Hochspannungstechnik |
| 10/2004 – 04/2011 | Studiengangswechsel: Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik mit dem Schwerpunkt Elektrische Energiesysteme an der Technischen Universität Darmstadt, Titel der Diplomarbeit: Dimensionierung und Konstruktion eines Versuchsaufbaus zum Testen von Vakuumschaltern unter einer kapazitiven Last. |
| 04/2004 – 09/2004 | Studium der Chemie an der Johannes Gutenberg Universität in Mainz |
| 04/2010 – 09/2010 | Fachpraktikum bei der Deutschen Flugsicherung, Langen |
| 03/2006 – 04/2006 | Grundpraktikum bei der Firma Aeropump in Hochheim |
| 08/2005 – 09/2005 | Grundpraktikum bei der Firma Aeropump in Hochheim |
| 06/2003 – 03/2004 | Grundwehrdienst beim 2. Panzerartillerielehrbataillon 345 in Kusel |
| 06/2003 | Erlangung der allgemeinen Hochschulreife (Abitur) an der Heinrich von Brentano Schule in Hochheim am Main |

16. Juni 2016

Erklärung laut § 9 PromO

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 13.06.2016

Torsten Psotta